การสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบจากขวดพอลิเอทิลีนที่ใช้แล้วกับเศษผงหนังสัตว์เพื่อใช้ทดแทนไม้หมอนรางรถไฟ

SYNTHESIS OF A COMPOSITE MATERIAL FROM USED PE BOTTLES AND LEATHER DUST FOR ALTERNATIVE SLEEPERS APPLICATION

จันทนา เทศเจริญ

CHANTANA TESCHAREON

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2761-6

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบจากขวดพอลิเอทิลีนที่ใช้แล้วกับเศษผงหนังสัตว์เพื่อใช้ทดแทนไม้หมอนรางรถไฟ

SYNTHESIS OF A COMPOSITE MATERIAL FROM USED PE BOTTLES AND LEATHER DUST FOR ALTERNATIVE SLEEPERS APPLICATION

จันทนา เทศเจริญ

CHANTANA TESCHAREON

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2761-6

SYNTHESIS OF A COMPOSITE MATERIAL FROM USED PE BOTTLES AND LEATHER DUST FOR ALTERNATIVE SLEEPERS APPLICATION

CHANTANA TESCHAREON

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2006

ISBN 974-15-2761-6

COPYRIGHT 2006
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบจากขวดพอลิเอทิลีนที่ใช้แล้วกับเศษผงหนังสัตว์ เพื่อใช้ทดแทนไม้หมอนรางรถไฟ
นักศึกษา	นางสาวจันทนา เทศเจริญ
รหัสนักศึกษา	46069001
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ไพศาล นาคพิพัฒน์

บทคัดย่อ

ปัจจุบันไม้หมอนรางรถไฟผลิตจากไม้จริง ซึ่งมีราคาแพงและปริมาณลดลงอย่างรวดเร็ว การใช้วัสดุสังเคราะห์ทดแทนไม้เป็นทางเลือกที่ดีอย่างหนึ่ง วิทยานิพนธ์นี้จึงมุ่งสนใจการสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบจากขวดพอลิเอทิลีนใช้แล้วกับเศษผงหนังสัตว์ที่เป็นของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกหนังเพื่อใช้ทดแทนไม้หมอนรางรถไฟ โดยศึกษาวิธีการขึ้นรูป ผลกระทบของขนาดและปริมาณของผงหนัง ปริมาณยางรีเคลม และการปรับปรุงพื้นผิวของผงหนังด้วยสารคู่ควบ รวมทั้งศึกษาการใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เพื่อปรับปรุงความเสถียรของวัสดุเชิงประกอบ จากการทดลองใช้ผงหนังขนาด 5 ถึง 7 mesh และ 20 ถึง 29 mesh โดยปรับเปลี่ยนปริมาณ 10, 30, 50, 70 และ 90 phr และใช้ยางรีเคลมในปริมาณ 5, 10, 15, 20 และ 25 phr ผสมวัสดุด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง แล้วขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีอัดในแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ซึ่งเป็นเวลาที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ พบว่าผงหนังขนาด 5 ถึง 7 mesh ในปริมาณ 70 phr และยางรีเคลมในปริมาณ 20 phr เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสม ที่ทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็ง 58.81 (Shore D) ความต้านแรงดัดโค้ง 23.66 N/mm^2 มอดุลัสยืดหยุ่น 4965.34 N/mm^2 ความต้านแรงกระแทก 6.51 kJ/m^2 จึงใช้อัตราส่วนนี้ในการศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นผิวของผงหนังเพื่อเพิ่มแรงยึดเกาะของเนื้อวัสดุด้วยไซเลนด้วยการปริมาณ 1-5 % (โดยน้ำหนัก) พบว่า 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลนเข้มข้น 5 % (โดยน้ำหนัก) มีประสิทธิภาพการทำงานดีที่สุด ขณะที่เอ็น-อะมิโนเอทิล 3-อะมิโนโพรพิลเมทิลไดเมทอกซีไซเลนให้ผลดีที่ความเข้มข้น 3 % (โดยน้ำหนัก) ส่วนการเติมไททาเนียมไดออกไซด์ในปริมาณ 1, 3 และ 5 phr พบว่าเมื่อปริมาณมากขึ้นวัสดุเชิงประกอบมีความคงตัวเพิ่มขึ้น

Thesis Title	Synthesis of a Composite Material from Used PE Bottles and Leather Dust for Alternative Sleepers Application
Student	Miss. Chantana Teschareon
Student ID.	46069001
Degree	Master of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2006
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Paisan Nakpipat

ABSTRACT

Nowadays, sleepers are made of woods that they are expensive and decreased in quantities rapidly. The substitution of woods by synthetic materials such as polymer composite is better. This thesis is focused on the synthesis of composite material from used PE bottles and leather dust from tanning industry for used as sleepers application. The processing conditions, the effect of amount of leather dust and size and amount of reclaimed rubber in the composite composition were studied. Also, leather dust modification by coupling agents, and composite stabilizing with titanium dioxide were done. The experiments were mixed PE with 5-7 mesh and 20-29 mesh in amount of 10, 30, 50, 70 and 90 phr. each and reclaimed rubber in the variation of 5, 10, 15, 20 and 25 phr. by two roll-mills. Then, the compounds were molded by thermal compression molding at 200°C for 5 minutes. The results obtained are; the amounts of 5-7 mesh leather dust and reclaimed rubber were 70 phr. and 20 phr. respectively gave the best composite properties as follow, hardness is 58.81 (Shore D), flexural strength is 23.66 N/mm^2, modulus of elastic is 4965.34 N/mm^2, and impact strength is 6.51 kJ/m^2. The study of leather dust modification by 1-5 wt% of 3-aminopropyltriethoxysilane and 1-5 wt% of N-aminoethyl-3-aminopropylmethyldimethoxysilane, the experimental results were 5 wt% of 3-aminopropyltriethoxysilane and 3 wt% of N-aminoethyl-3-aminopropylmethyldimethoxysilane gave the best results. Moreover, improvement of composite stability by adding 1, 3 and 5 phr. of titanium dioxide was examined. It was found that increasing amount of titanium dioxide will lead to higher stability of composite.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำจาก รศ.ดร.ไพศาล นาคพิพัฒน์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งต่อความอนุเคราะห์จากท่านเป็นอย่างยิ่ง และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอบพระคุณ คุณวีรวิทย์ ศรีงาม ฝ่ายงานโยธา การรถไฟแห่งประเทศไทย กรมวิทยาศาสตร์บริการและคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้สนับสนุนเครื่องมือ ตลอดจนข้อมูล และหนังสือต่างๆ ที่ใช้ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ คุณพิสันต์ ผลโพธิ์ เจ้าหน้าที่ปฏิบัติการ และคุณพิมใจ ภู่ชนะกิจ เจ้าหน้าที่ธุรการประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี ที่เป็นธุระในการประสานงานต่างๆ ให้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ ในภาควิชาวิศวกรรมเคมีทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

จันทนา เทศเจริญ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ...II

กิตติกรรมประกาศ...III

สารบัญ..V

สารบัญตาราง...VI

สารบัญรูป..VII

บทที่ 1 บทนำ...1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา...1

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา...2

1.3 สมมติฐานของการศึกษา..2

1.4 ขอบเขตการวิจัย...2

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ...3

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..4

2.1 ไม้...4

2.2 พอลิเอทิลีน..6

2.3 หนังฟอก..7

2.4 ยางรีเคลม...12

2.5 วัสดุเชิงประกอบ..13

2.6 การขึ้นรูปแบบอัดด้วยแม่พิมพ์..18

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..20

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย...22

3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย..22

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย..22

3.3 ศึกษาสมบัติเบื้องต้นของพอลิเอทิลีนที่ใช้แล้วและผงหนัง...23

3.4 ศึกษากระบวนการผลิตวัสดุเชิงประกอบ..23

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5 ศึกษาผลกระทบของขนาดและปริมาณผงหนัง
ที่มีต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ..24
3.6 ศึกษาผลกระทบของปริมาณยางรีเคลมที่มีต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ...............24
3.7 ศึกษาประสิทธิภาพและปริมาณสารคู่ควบไซเลน
ที่ใช้ปรับปรุงพื้นผิวของผงหนัง..25
3.8 ศึกษาผลกระทบของปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์
ที่มีต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ..25
3.9 การทดสอบสมบัติต่างๆ ของวัสดุเชิงประกอบ...26

บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง
4.1 ผลการศึกษาสมบัติเบื้องต้นของพอลิเอทิลีนที่ใช้แล้วและผงหนัง.........................35
4.2 ผลการศึกษากระบวนการผลิตวัสดุเชิงประกอบ..37
4.3 ผลการศึกษาขนาดและปริมาณผงหนังที่มีต่อวัสดุเชิงประกอบ............................39
4.4 ผลการศึกษาปริมาณยางรีเคลมที่มีต่อวัสดุเชิงประกอบ...................................44
4.5 ผลการศึกษาประสิทธิภาพและปริมาณสารคู่ควบไซเลนที่ใช้
ปรับปรุงพื้นผิวของผงหนัง.. 47
4.6 ผลการศึกษาการใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีต่อวัสดุเชิงประกอบ.......................52
4.7 ผลการเปรียบเทียบสมบัติของไม้และวัสดุเชิงประกอบ....................................55

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ...57

บรรณานุกรม..59

ภาคผนวก..63
ภาคผนวก ก. 64
ภาคผนวก ข. 69
ภาคผนวก ค. 70

ประวัติผู้เขียน..71

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 สมบัติทางธรรมชาติของไม้ที่ใช้ผลิตไม้หมอนรางรถไฟโดยทั่วไป 6

2.2 สมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนเชิงพานิชย์ 7

3.1 อัตราส่วนของวัสดุที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของขนาดและปริมาณผงหนัง..................24

3.2 อัตราส่วนของวัสดุที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของปริมาณยางรีเคลม.........................24

3.3 อัตราส่วนของวัสดุที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพและปริมาณสารคู่ควบไซเลน
ที่ใช้ปรับปรุงพื้นผิวของผงหนัง..25

3.4 อัตราส่วนของวัสดุที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์..............26

3.5 ค่าความแข็งของพลาสติกโดยทั่วๆ ไป..29

4.1 สมบัติของพอลิเอทิลีนที่ใช้แล้ว...35

4.2 สมบัติเบื้องต้นของผงหนัง...35

4.3 การกระจายขนาดของผงหนัง...36

4.4 อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของผงหนัง.................................42

4.5 ตำแหน่งสเปคตรัมของผงหนังที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน...............48

4.6 การเปรียบเทียบสมบัติของไม้ที่ใช้ทำไม้หมอนรางรถไฟกับวัสดุเชิงประกอบ................56

ก. 1 ข้อมูลที่วิเคราะห์ได้จากการศึกษากระบวนการผลิตวัสดุเชิงประกอบ..........................64

ก. 2 ข้อมูลที่วิเคราะห์ได้จากการศึกษาผลกระทบของขนาดและปริมาณผงหนัง
ที่มีต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ..65

ก. 3 ข้อมูลที่วิเคราะห์ได้จากการศึกษาผลกระทบของปริมาณยางรีเคลม
ที่มีต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ..66

ก. 4 ข้อมูลที่วิเคราะห์ได้จากการศึกษาประสิทธิภาพและปริมาณสารคู่ควบไซเลน
ที่ใช้ปรับปรุงพื้นผิวของผงหนัง..67

ก. 5 ข้อมูลที่วิเคราะห์ได้จากการศึกษาผลกระทบของปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์
ที่มีต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ..68

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 การจัดเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน....................................4

2.2 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอทิลีน..6

2.3 กลไกการปฏิกิริยาระหว่างกรดอะมิโนแต่ละชนิด.......................................8

2.4 ลักษณะเส้นใยคอลลาเจน 8

2.5 กระบวนการผลิตหนังสัตว์ฟอก 11

2.6 การยึดติดระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ 15

2.7 ตัวอย่างวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนเสริมแรงที่ต่างกัน......................................16

2.8 เครื่องขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์อัด 18

2.9 ลักษณะการไหลของพลาสติก..19

3.1 เครื่องมือทดสอบความต้านแรงกระแทกแบบไอซอด...................................27

3.2 ชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบความต้านแรงกระแทกแบบไอซอด...................28

3.3 ลักษณะหัวกดแบบ D 29

3.4 การทดสอบความต้านแรงดัดโค้ง...31

3.5 เครื่องกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเลต.. 31

3.6 เครื่องมือและการทดสอบความทนทานต่อสภาพแวดล้อม.................................32

3.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด..33

3.8 เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมสารตัวอย่าง...34

3.9 เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์..34

4.1 ลักษณะของกระจุกเส้นใยกำลังขยาย 1000 เท่า...36

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับเวลาในการขึ้นรูป............................. 37

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับเวลาในการขึ้นรูป......................................38

4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านแรงดัดโค้งกับเวลาในการขึ้นรูป....................... 38

4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสยืดหยุ่นกับเวลาในการขึ้นรูป............................ 39

4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านแรงกระแทกกับเวลาในการขึ้นรูป.......................39

4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับปริมาณผงหนัง
ที่ปริมาณยางรีเคลม 15 phr..40

4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านแรงดัดโค้งกับปริมาณผงหนัง
ที่ปริมาณยางรีเคลม 15 phr..40

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสยืดหยุ่นกับปริมาณผงหนัง ที่ปริมาณยางรีเคลม 15 phr........41

4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านแรงกระแทกกับปริมาณผงหนัง ที่ปริมาณยางรีเคลม 15 phr........41

4.11 ลักษณะการกระจายตัวของผงหนังปริมาณต่างๆ ที่ปริมาณยางรีเคลม 15 phr กำลังขยาย 60 เท่า........43

4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับปริมาณยางรีเคลม........45

4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านแรงดัดโค้งกับปริมาณยางรีเคลม........45

4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสยืดหยุ่นกับปริมาณยางรีเคลม........46

4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านแรงกระแทกกับปริมาณยางรีเคลม........46

4.16 กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไซเลนกับหมู่ฟังก์ชันของผงหนัง........47

4.17 อินฟราเรดสเปกตรัมของผงหนัง........48

4.18 ลักษณะผงหนังที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน กำลังขยาย 1000 เท่า........49

4.19 ลักษณะการยึดเกาะของผงหนังกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ กำลังขยาย 500 เท่า........49

4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับปริมาณสารคู่ควบไซเลน........50

4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านแรงดัดโค้งกับปริมาณสารคู่ควบไซเลน........51

4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสยืดหยุ่นกับปริมาณสารคู่ควบไซเลน........51

4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านแรงกระแทกกับปริมาณสารคู่ควบไซเลน........52

4.24 ลักษณะการสะท้อนแสงยูวี........52

4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับระยะเวลาการฉายแสง........53

4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านแรงดัดโค้งกับระยะเวลาการฉายแสง........54

4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสยืดหยุ่นกับระยะเวลาการฉายแสง........54

4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านแรงกระแทกกับระยะเวลาการฉายแสง........55

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันไม้เป็นทรัพยากรธรรมชาติที่เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับมนุษย์ เช่น การนำไม้มาแปรรูปเป็นสิ่งของเครื่องใช้ ใช้ในการก่อสร้างที่พักอาศัย รวมทั้งใช้เป็นวัสดุการทาง เช่น ไม้หมอนรางรถไฟ เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันประเทศไทยมีทางรถไฟเป็นระยะทางรวมทั้งสิ้น 4,180 กิโลเมตร [1] ดังนั้นความต้องการไม้หมอนรางรถไฟจึงมีมากขึ้นตามไปด้วย ในขณะเดียวกันไม้ในประเทศกลับมีปริมาณลดลง จนต้องมีการนำเข้าไม้หมอนรางรถไฟจากต่างประเทศในแต่ละปีเป็นจำนวนมาก เมื่อเทียบกับการส่งออกไม้หมอนรางรถไฟที่มีเพียงเล็กน้อย [2] อีกทั้งในปัจจุบัน ภาคอุตสาหกรรมได้มีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้ปริมาณขยะหรือของเสียมีอัตราเฉลี่ยเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.2 ต่อปี [3, 4] ส่วนหนึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ถูกใช้อย่างกว้างขวางเพื่อเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมหลายประเภท จากความนิยมใช้พอลิเมอร์โดยเฉพาะวัสดุประเภทพลาสติกได้ทำให้ขยะจากพลาสติกมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพลาสติกบรรจุภัณฑ์ ชิ้นส่วนรถยนต์ เป็นต้น เนื่องจากพลาสติกมีความหนาแน่นต่ำ ดังนั้นจึงก่อให้เกิดปัญหาในการกำจัด เช่นเดียวกับเศษหนังฟอกจากโรงงานฟอกหนัง ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งอย่างหนึ่งที่มีปริมาณรวมกันมากถึงวันละหลายสิบตัน โดยขยะเหล่านี้มีการนำส่วนที่เหลือจากการฝังกลบนำไปเผาเพื่อใช้พลังงาน และนำบางส่วนกลับมาใช้ใหม่ โดยวิธีการนำขยะพลาสติกกลับมาใช้ใหม่สามารถทำได้คือ [5]

1. การทำลายโครงสร้างโมเลกุลเดิม
   - แตกพันธะได้มอนอเมอร์ตั้งต้นตัวเดิม เพื่อนำไปใช้ทำปฏิกิริยากลับมาเป็นพอลิเมอร์ชนิดเดิม
   - แตกพันธะได้มอนอเมอร์ตัวใหม่ เพื่อนำไปทำปฏิกิริยาได้เป็นพอลิเมอร์ตัวใหม่
   - แตกพันธะเป็นโอลิโกเมอร์ เพื่อนำไปใช้งานในด้านอื่น
2. การรักษาโครงสร้างเดิม
   - การใช้ความร้อนหลอมขยะพลาสติกที่ผ่านการคัดแยก เพื่อการใช้งานเดิมแต่มีสมบัติที่ลดลง
   - การใช้ความร้อนหลอมขยะพลาสติกที่ผสมกัน เพื่อการใช้งานที่ลดลง
   - การลดขนาดขยะพลาสติก เพื่อการใช้เป็นสารตัวเติม

ในการใช้งานบางประเภท วัสดุพลาสติกจะมีสมบัติที่ไม่เหมาะสม เนื่องจากพลาสติกมีความอ่อนและเสียรูปได้ง่ายที่อุณหภูมิสูงๆ จึงต้องมีการปรับปรุงสมบัติคือ การผสมสารตัวเติมเพื่อช่วยเสริมแรงผลิตเป็นวัสดุที่เรียกว่า วัสดุเชิงประกอบ โดยวัสดุเชิงประกอบมีข้อดีหลายอย่าง เช่น

น้ำหนักเบา ความแข็งแรงและมอดุลัสต่อน้ำหนักสูง การขึ้นรูปง่ายและสามารถนำไปใช้แทนไม้ได้ ซึ่งองค์ประกอบหลักๆ ของวัสดุเชิงประกอบมีด้วยกันสองส่วน คือ ส่วนวัสดุโครงสร้าง (Matrix) และส่วนวัสดุเสริมแรง (Reinforcement) [6, 7] เส้นใยธรรมชาตินี้ เป็นวัสดุที่น่าสนใจในการนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในวัสดุเชิงประกอบ เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติมีข้อดีคือ ราคาถูก ความหนาแน่นต่ำ เกิดการเสียหายระหว่างกระบวนการผลิตต่ำ ไม่เป็นพิษต่อร่างกาย ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ และหาได้ง่าย [8] แต่เส้นใยธรรมชาติมีข้อเสีย เช่น ทนความร้อนได้ต่ำกว่าเส้นใยสังเคราะห์ มีสมบัติการดูดความชื้น

ด้วยสาเหตุดังกล่าว จึงมีแนวความคิดที่จะศึกษาและพัฒนาวิธีการนำวัสดุใช้แล้ว เช่น ขวดน้ำพอลิเอทิลีน และวัสดุที่เป็นของเสียจากอุตสาหกรรม เช่น ผงหนังจากโรงงานฟอกหนัง มาผลิตเป็นวัสดุเชิงประกอบสำหรับใช้แทนไม้หมอนรางรถไฟ เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าและลดปริมาณขยะเหล่านั้น ตลอดจนการเพิ่มคุณภาพของวัสดุเชิงประกอบดังกล่าวให้มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานตามวัตถุประสงค์ด้วยการใช้สารเติมแต่งต่างๆ ในกระบวนการผลิต

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการลดปริมาณขยะ โดยนำพอลิเอทิลีนและหนังสัตว์ฟอกที่ผ่านการใช้งานแล้วมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

1.2.2 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงสมบัติของวัสดุเชิงประกอบโดยใช้สารตัวเติมและสารเติมแต่งชนิดต่างๆ

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1.3.1 ผงหนังที่มีขนาดแตกต่างกัน อาจมีผลต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ

1.3.2 สมบัติของวัสดุเชิงประกอบ แปรผันตามปริมาณผงหนังและยางรีเคลมที่ประกอบอยู่ในวัสดุเชิงประกอบ

1.3.3 การใช้สารคู่ควบจะช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างเมทริกซ์และผงหนัง ซึ่งประสิทธิภาพของสารคู่ควบแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน

1.3.4 การเติมไททาเนียมไดออกไซด์จะช่วยเพิ่มความเสถียรให้กับวัสดุเชิงประกอบ

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 ศึกษากระบวนการผลิตวัสดุเชิงประกอบจากวัสดุเหลือใช้พอลิเอทิลีนและผงหนัง

1.4.2 ศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ เช่น ขนาดผงหนัง ปริมาณผงหนัง และปริมาณยางรีเคลม

1.4.3 ปรับปรุงการยึดเกาะของผงหนังด้วยสารคู่ควบ โดยศึกษาประสิทธิภาพและปริมาณสารคู่ควบแต่ละชนิด

1.4.4 ปรับปรุงความเสถียรของวัสดุเชิงประกอบในสภาวะแวดล้อม ด้วยไททาเนียมไดออกไซด์และศึกษาผลกระทบที่มีต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบหลังการฉายรังสีที่เวลาต่างๆ

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถผลิตวัสดุเชิงประกอบจากวัสดุเหลือใช้พอลิเอทิลีนและผงหนัง ด้วยกระบวนการผลิตที่เหมาะสม

1.5.2 เป็นทางเลือกเพื่อแสวงหาวัสดุทดแทนไม้จากวัสดุที่มีมูลค่าต่ำ

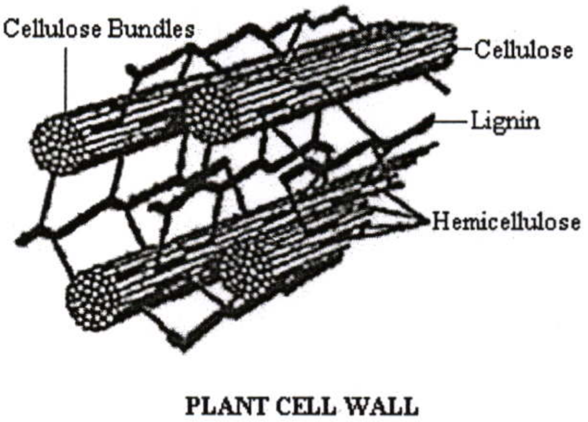
1.5.3 สามารถเพิ่มมูลค่าและลดปัญหาวัสดุเหลือใช้ทางอุตสาหกรรม

1.5.4 เรียนรู้วิธีการจัดการและการวางแผนในการวิจัย

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไม้ (Woods)

ไม้เป็นวัสดุธรรมชาติชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ ในปัจจุบันมีการนำไม้มาแปรรูปเพื่อสร้างผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิด เช่น เฟอร์นิเจอร์ ได้แก่ ตู้ โต๊ะ เก้าอี้ เป็นต้น วัสดุก่อสร้าง ได้แก่ ไม้ก่อสร้างต่างๆ ไม้แบบ ไม้หมอนรางรถไฟ เป็นต้น องค์ประกอบหลักๆ ทางเคมีของไม้ คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ที่มีการจัดเรียงตัวขององค์ประกอบ ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การจัดเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน [9]

โดยทั่วไป อาจจำแนกชนิดของไม้แปรรูปตามความแข็งแรงของไม้ที่มีความชื้นในเนื้อไม้ระหว่าง 10 ถึง 14 เปอร์เซ็นต์ และความทนทานตามธรรมชาติของไม้ชนิดนั้นๆ ได้เป็น 3 ชนิด [10, 11, 12] คือ

- ไม้เนื้อแข็ง
- ไม้เนื้อปานกลาง
- ไม้เนื้ออ่อน

2.1.1 ไม้เนื้อแข็ง

ไม้เนื้อแข็ง เป็นไม้ที่มีเนื้อแกร่งและเหนียวมีความแข็งแรงและทนทานต่อการใช้งานท่ามกลางแดดและฝนได้ดีมาก เนื้อไม้มีทั้งชนิดเนื้อหยาบไปจนถึงเนื้อละเอียดทั้งชนิดเสี้ยนไม้ตรงและเสี้ยนไม้สับสน ไม้เนื้อแข็งยากต่อการเลื่อย ไสกบและตกแต่ง แต่ขัดมันได้ดี เนื่องจากเนื้อไม้ส่วนใหญ่จะเป็นมันในตัว ไม้ชนิดนี้ส่วนใหญ่จะมีสีเข้ม เป็นไม้ที่มีน้ำหนักมาก โดยทั่วไปจะหนักตั้งแต่ประมาณ 720 ถึง 1120 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรหรือกว่านั้น ไม้เนื้อแข็งบางชนิด ได้แก่ เต็ง

รัง ประดู่ เคียม มะค่าโมง ชิงชัน แดง มะเกลือ ยมหิน เลียงมัน เสลา หลุมพอ แอ๊ก ตีนนก และบุนนาก

2.2.2 ไม้เนื้อปานกลาง

ไม้เนื้อปานกลาง เป็นไม้ที่มีความหนาแน่นของเนื้อไม้อยู่ในระดับปานกลาง มีความแข็งแรงและทนทานพอประมาณ เนื้อไม้มีทั้งชนิดเนื้อหยาบไปจนถึงเนื้อละเอียด แต่ส่วนใหญ่จะเป็นไม้เนื้อละเอียด เสี้ยนไม้ตรงหรือเกือบตรง จึงสะดวกต่อการเลื่อย ไสกบและตกแต่ง และเนื่องจากส่วนใหญ่จะเป็นไม้ที่มีลวดลายสวยงาม จึงนิยมนำมาใช้ในการทำเครื่องเรือน สีของไม้ชนิดนี้จะอยู่ในระดับกลาง เป็นไม้ที่มีน้ำหนักตั้งแต่ประมาณ 690 ถึง 1130 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ไม้เนื้อปานกลางบางชนิดได้แก่ ไม้ตะเคียนทอง ตะเคียน ตะแบก นนทรี มะค่าแต้ ยูง และรกฟ้า

2.2.3 ไม้เนื้ออ่อน

ไม้เนื้ออ่อน เป็นไม้ที่มีเนื้ออ่อนและหยาบ มีความแข็งแรงและทนทานน้อยที่สุด มอดหรือปลวกชอบทำลาย การยืดหรือหดตัวไม่สม่ำเสมอมากบ้างน้อยบ้างแล้วแต่ชนิดไม้ สีของเนื้อไม้แตกต่างกันออกไปจากสีอ่อนไปจนถึงสีเกือบเข้ม ไม้ชนิดนี้จะมีน้ำหนักตั้งแต่ประมาณ 500 ถึง 870 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ไม้เนื้ออ่อนบางชนิด ได้แก่ ไม้กระท้อน จำปาป่า กระบาก ยมหอม กระเจา พะยอม สัก และอินทนิน

สำหรับไม้หมอนที่ใช้ในการทางรถไฟโดยทั่วไปมี 5 ชนิด คือ

- ไม้หมอนธรรมดา
- ไม้หมอนสะพานไม้
- ไม้หมอนสะพานเหล็ก
- ไม้หมอนสะพานเหล็กพิเศษ
- ไม้หมอนประแจทางหลีก

ส่วนใหญ่ไม้ที่นำมาใช้ผลิตไม้หมอนรางรถไฟนั้น โดยลักษณะและคุณภาพของไม้ของฝ่ายโยธา การรถไฟแห่งประเทศไทย ตามแบบ รม.8 และ รม.9 ระบุจะต้องเป็นไม้ที่มีสภาพสมบูรณ์ มีคุณภาพดี เนื้อไม้แน่น ไม่เป็นกาบที่จะหลุดล่อนออกจากกันได้ในภายหลัง ไม่มีกระพี้มากเกินควร มีลำต้นตรงได้ขนาดและลักษณะตามกำหนดของกรมป่าไม้ที่อนุญาตให้ตัดฟันได้ จะต้องปราศจากรอยตำหนิที่จะกระทบกระเทือนต่อความคงทนของเนื้อไม้ และปราศจากสิ่งแปลกปลอมต่างๆ

ปัจจุบันไม้ที่ใช้เป็นไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้อปานกลาง ซึ่งมีหลากหลายชนิด เช่น เต็ง รัง ประดู่ เคี่ยม ตะเคียนชัน ตะเคียนทอง แอ๊ก เป็นต้น สมบัติโดยรวมของไม้เหล่านี้ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางธรรมชาติของไม้ที่ใช้ผลิตไม้หมอนรางรถไฟโดยทั่วไป [11, 13]

สมบัติทั่วไป	ค่าที่วิเคราะห์ได้
ความชื้น (%)	12-14
ความถ่วงจำเพาะ	0.70-1.10
ความเหนียวการเคาะ (kg.m)	2.12-6.10
ความต้านแรงดัด (kg/cm^2)	600-1000
ความแข็ง (Janka)	650-1100
อายุการใช้งาน (ปี)	>6

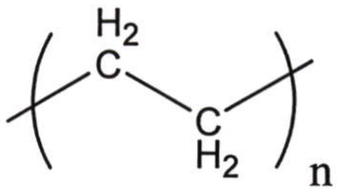
หมายเหตุ ปริมาณความชื้น คิดเป็นส่วนร้อยของน้ำหนักไม้อบแห้งที่มีความชื้นต่ำกว่า 16% ถือว่าเป็นไม้แห้ง เกินกว่า 25% เป็นไม้เปียก

ความเหนียวการเคาะ หมายถึง ค่าพลังงานที่ต้องใช้ในการทำไม้ให้หัก

ความดื้อ หมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์การยืดหยุ่น (Modulus of elastic) ที่ได้จากการดัด

2.2 พอลิเอทิลีน (Polyethylene) [14]

พอลิเมอร์ชนิดนี้เป็นเทอร์โมพลาสติก โดยมีโครงสร้างเป็นเส้นตรงเกือบตลอด มีโซ่สาขาบ้างแต่น้อยมาก มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอทิลีน [14]

พอลิเอทิลีน เป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากปฏิกิริยาการเติม (Addition reaction) มีวิธีการผลิตในทางอุตสาหกรรมหลายวิธี ที่สำคัญได้แก่

2.2.1 กระบวนการซีเกลอร์ (Zeigler process)

กระบวนการนี้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของซีเกลอร์แนตตา ได้แก่ ไททาเนียมเตตระคลอไรด์ อลูมิเนียมอัลคิล ที่ความดันสูงกว่าบรรยากาศเพียงเล็กน้อย ประมาณ 2-4 บรรยากาศ และอุณหภูมิประมาณ 50-70 องศาเซลเซียส ในตัวกลางเฉื่อย เช่น เฮปเทนหรือโทลูอีน และในบรรยากาศเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน เนื่องจากพอลิเอทิลีนไม่ละลายในตัวกลางเฉื่อย ดังนั้นเมื่อเกิดเป็นพอลิเมอร์แล้วจะ

ตกตะกอนออกมา พอลิเมอร์ที่ได้จะต่างจากพวกพอลิเมอร์ที่เตรียมจากกระบวนการใช้ความดันสูงมาก คือมีโครงสร้างเป็นเชิงเส้น มีแขนงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

2.2.2 กระบวนการฟิลลิปส์ (Phillips process)

กระบวนการนี้ใช้โครเมียมออกไซด์บนซิลิกาหรืออลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในตัวกลางเฉื่อย เช่น ไซโคลเฮกเซน สภาวะของปฏิกิริยาอยู่ระหว่างกลางของกระบวนการความดันสูงที่ใช้เตรียมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและกระบวนการซีเกลอร์ ความดันที่ใช้ทั่วไปประมาณ 30-40 บรรยากาศ และอุณหภูมิ 90-160 องศาเซลเซียส พอลิเอทิลีนที่ได้มีโครงสร้างเป็นเชิงเส้นเกือบสมบูรณ์

2.2.3 กระบวนการสแตนดาร์ดออยล์ (Standard oil process)

กระบวนการนี้คล้ายคลึงกับกระบวนการฟิลลิปส์มาก ตัวเร่งที่ใช้ได้แก่ ออกไซด์ของโลหะ เช่น โมลิบดินัมไตรออกไซด์บนอะลูมินา หรือ ไททาเนียมไดออกไซด์ ความดันของปฏิกิริยา 40-100 บรรยากาศ และอุณหภูมิของปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 200-300 องศาเซลเซียส พอลิเมอร์ที่ได้มีโครงสร้างเป็นเชิงเส้นเกือบสมบูรณ์

สำหรับพอลิเอทิลีน มีสมบัติเบื้องต้นดังตารางที่ 2.2 โดยปริมาณมากกว่าร้อยละ 40 ของพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นสูง ถูกใช้ในการผลิตขวดพลาสติกและภาชนะบรรจุอื่นๆ อีกประมาณร้อยละ 20 ใช้ทำของใช้ในครัวเรือนและของเด็กเล่น ส่วนที่เหลือใช้ทำฟิล์มเพื่อหุ้มของและอาหาร ถุงร้อน และอื่นๆ

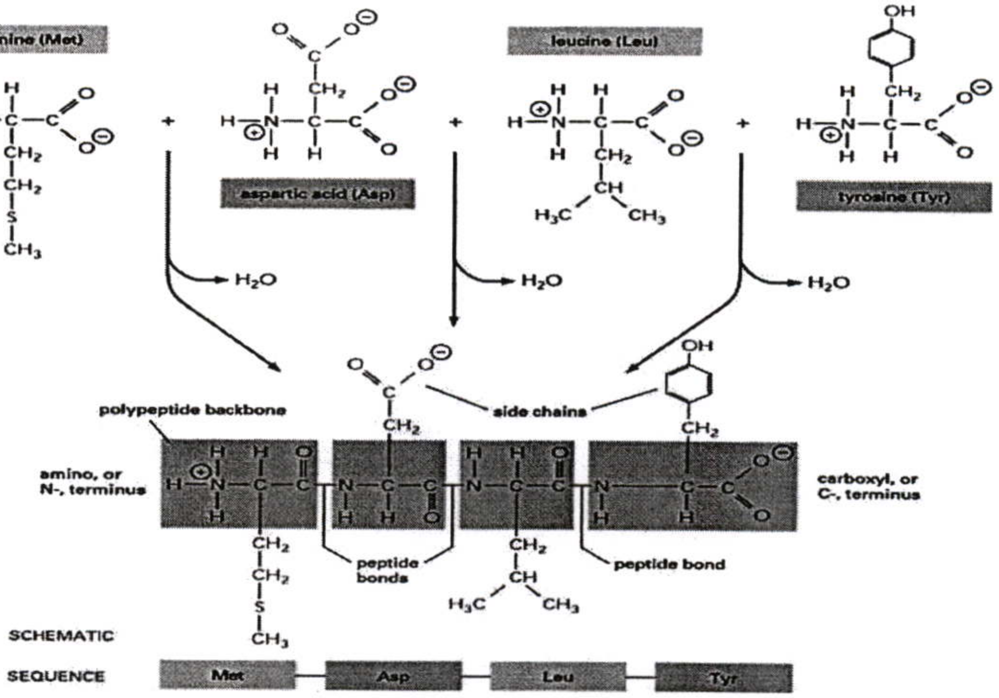
ตารางที่ 2.2 สมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนเชิงพานิชย์ [14, 15]

สมบัติ	LDPE	HDPE
ความหนาแน่น (g/cm^3)	0.91-0.93	0.94-0.97
ความเป็นผลึก (%)	50-70	80-95
อุณหภูมิหลอมเหลว ($^{\circ}C$)	98-120	127-135
ความต้านแรงดึง (MPa)	4.1-16	21-38
มอดุลัส (MPa)	0.1-0.26	0.41-1.24
ความต้านแรงกระแทก (Izod) (Jm^{-2})	No break	27-1068

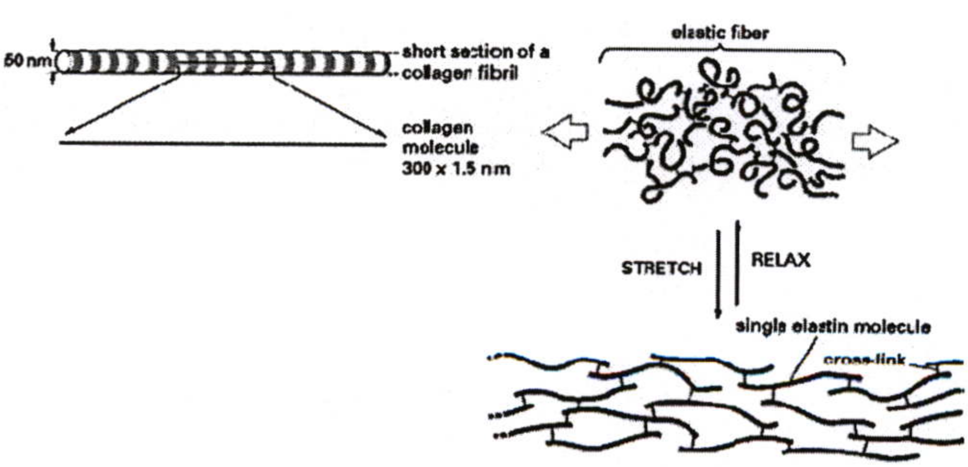
2.3 หนังฟอก (Leather) [16]

หนังฟอกเป็นวัสดุหลักที่ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องหนังต่างๆ เช่น กระเป๋า รองเท้า โซฟา เบาะรถยนต์ เป็นต้น ประมาณร้อยละ 90 ของหนังดิบที่นำมาฟอกจะเป็นหนังโคและกระบือ ที่เหลือเป็นหนัง งู จระเข้ แกะ ปลากระเบน หมู และอื่นๆ หนังสัตว์มีองค์ประกอบหลัก คือ โปรตีน ซึ่งเป็น

พอลิเมอร์ชนิดพอลิเอไมด์ (Polyamide) ประกอบด้วยกรดอะมิโนประมาณ 20 ชนิด ยึดเกาะกันด้วยพันธะเปปไทด์ (Peptide bond) ยกตัวอย่างเช่น การเกิดพันธะเปปไทด์จากกรดอะมิโนเมทิโอนิน (Methionine) แอสพาติก (Aspatic acid) ลิวซีน (Leucine) และไทโรซีน (Tyrosine) ดังรูปที่ 2.3 สำหรับโปรตีนที่มีลักษณะเป็นเส้นมีสมบัติที่ไม่ละลายน้ำพบมากในหนังสัตว์ คือ คอลลาเจน (Collagen) ซึ่งเกิดจากสายโซ่โปรตีนจำนวน 3 เส้นอยู่รวมกันในลักษณะเกลียว ทำให้มีสมบัติคล้ายยาง คือ โมเลกุลจะยืดออกเมื่อเส้นใยถูกดึงและจะหดตัวตัวกลับเมื่อไม่มีแรงกระทำ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 กลไกการปฏิกิริยาระหว่างกรดอะมิโนแต่ละชนิด [17]



รูปที่ 2.4 ลักษณะเส้นใยคอลลาเจน [17]

หนังสัตว์ที่ผ่านกระบวนการฟอกและตกแต่งแล้ว จะเป็นแผ่นหนังที่มีความเสถียรหรือความคงทน ซึ่งกระบวนการฟอกนี้จะทำให้เกิดการเชื่อมต่อระหว่างไอออนของโครเมียม (Cr^{2+}) กับหมู่คาร์บอกซิล (COO^-) ของคอลลาเจนในสายโซ่โปรตีน โดยจะมีผลต่อคุณภาพของหนังสัตว์ฟอก เช่น สี ความต้านทานต่อสารเคมี น้ำ และแบคทีเรีย

สำหรับกระบวนการฟอกหนัง มีขั้นตอนสำคัญ คือ การเตรียมหนังก่อนฟอก การฟอก และการตกแต่ง ดังรูปที่ 2.5

2.3.1 การเตรียมหนังก่อนฟอก (Beamhouse process)

เริ่มจากการเตรียมหนังดิบ (Raw hides and skin) ให้พร้อมที่จะฟอก โดยเริ่มจากการล้าง (Washing) การคัดแยกและตัดแต่งหนังเค็ม (Sorting and Trimming) หรือเป็นการกำจัดส่วนที่ไม่ต้องการ เช่น กีบเท้า ขน เศษหนัง จากขั้นตอนนี้จะได้เศษหนัง ซึ่งเป็นส่วนที่สามารถนำไปบดผลิตเป็นหนังพื้นรองเท้า จากนั้นจะนำหนังที่ได้มาล้างและแช่ในน้ำให้คืนตัว (Washing and Soaking) และทำการแช่น้ำปูน (Liming) กำจัดขนออกด้วยซัลไฟด์ ถากหนัง (Fleshing) ผ่าหนัง (Splitting) หนังเมื่อผ่าแยกชั้นแล้ว จะมี 2 ส่วน คือ ส่วนบนเรียกว่า Upper หรือ Grain ส่วนนี้จะนำไปผลิตเป็นหนังฟอก และส่วนล่างเรียกว่า Splits ส่วนนี้จะนำไปผลิตเป็นสินค้าแทะเล่นของสัตว์เลี้ยง (Dogchew) และหนังฟอกคุณภาพรอง ต่อจากนั้นจะนำหนังมาล้างน้ำปูน (Deliming) และบ่มหนัง (Bating) เพื่อให้หนังนุ่มและหดตัว

2.3.2 การฟอก (Tanning process)

การฟอกหนังเป็นการเปลี่ยนสภาพหนังดิบซึ่งเน่าเปื่อยได้ให้เป็นหนังสำเร็จที่คงตัวกว่า ไม่เน่าเปื่อย มีความทนทานต่อสภาพอากาศและน้ำร้อน จะต้องใช้สารเคมีบางชนิด เช่น ฝาด โครเมียม หรือสารเคมีตัวอื่นๆ ไปทำปฏิกิริยากับโปรตีน (คอลลาเจน) ในหนัง กรรมวิธีการฟอกหนังที่ใช้กันอยู่มี 2 วิธี คือ

2.3.2.1 การฟอกโครม (Chrome Tanning) การฟอกประเภทนี้เป็นที่นิยมกว่าเนื่องจากใช้เวลาสั้น เป็นที่ต้องการของตลาด สารเคมีราคาถูก หนังที่ฟอกแล้วทนต่อความร้อนและความชื้นได้ดีกว่า ซึ่งจะใส่สารเคมีจำพวกโครมลงไป สารนี้เป็นพวกเกลือของโครเมียม เช่น โครมิคเป็นตัวฟอก ซึ่งจะทำให้หนังมีสภาพเป็นไฟเบอร์ เมื่อนำไปตากแห้งแล้วจะแข็งมีสีเขียว การตรึงโครมให้อยู่กับหนังสามารถเพิ่มขึ้นได้ด้วยการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ดังนั้นระหว่างการฟอกโครมจึงต้องเติมแมกนีเซียมออกไซด์ลงไปทีละน้อยอย่างช้าๆ เพื่อได้ค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้คือ 4.5 หนังที่ผ่านการฟอกโครมแล้วเรียกว่า หนังเขียว ขั้นตอนต่อมาคือการล้างด่าง (Neutralization)

2.3.2.2 การฟอกฝาด (Vegetable Tanning) การฟอกประเภทนี้จะนำสารสกัดประเภทแทนนินซึ่งสกัดจากเปลือกไม้ยูคาลิปตัส มาเป็นตัวฟอก ทั้งนี้น้ำที่ใช้ฟอกแล้วสามารถนำ

กลับมาใช้ได้อีก ขั้นตอนต่อมาคือ การล้างหนัง โดยการใช้กรดออกซาลิกล้างฝาดออกจากหนัง เพื่อล้างฝาดส่วนที่เกินออก ซึ่งจะมีผลต่อคุณภาพหนังอย่างมาก

จากนั้นหนังที่ได้จากทั้ง 2 วิธีการฟอก จะถูกนำไปรีดน้ำ เพื่อทำให้แห้งและมีการตัดเจียนผิวด้วยเครื่องตัดแต่งและคัดเลือก เพื่อรอจำหน่ายหรือแปรรูปตามความต้องการของตลาดต่อไป

2.3.3 การตกแต่ง (Finishing process)

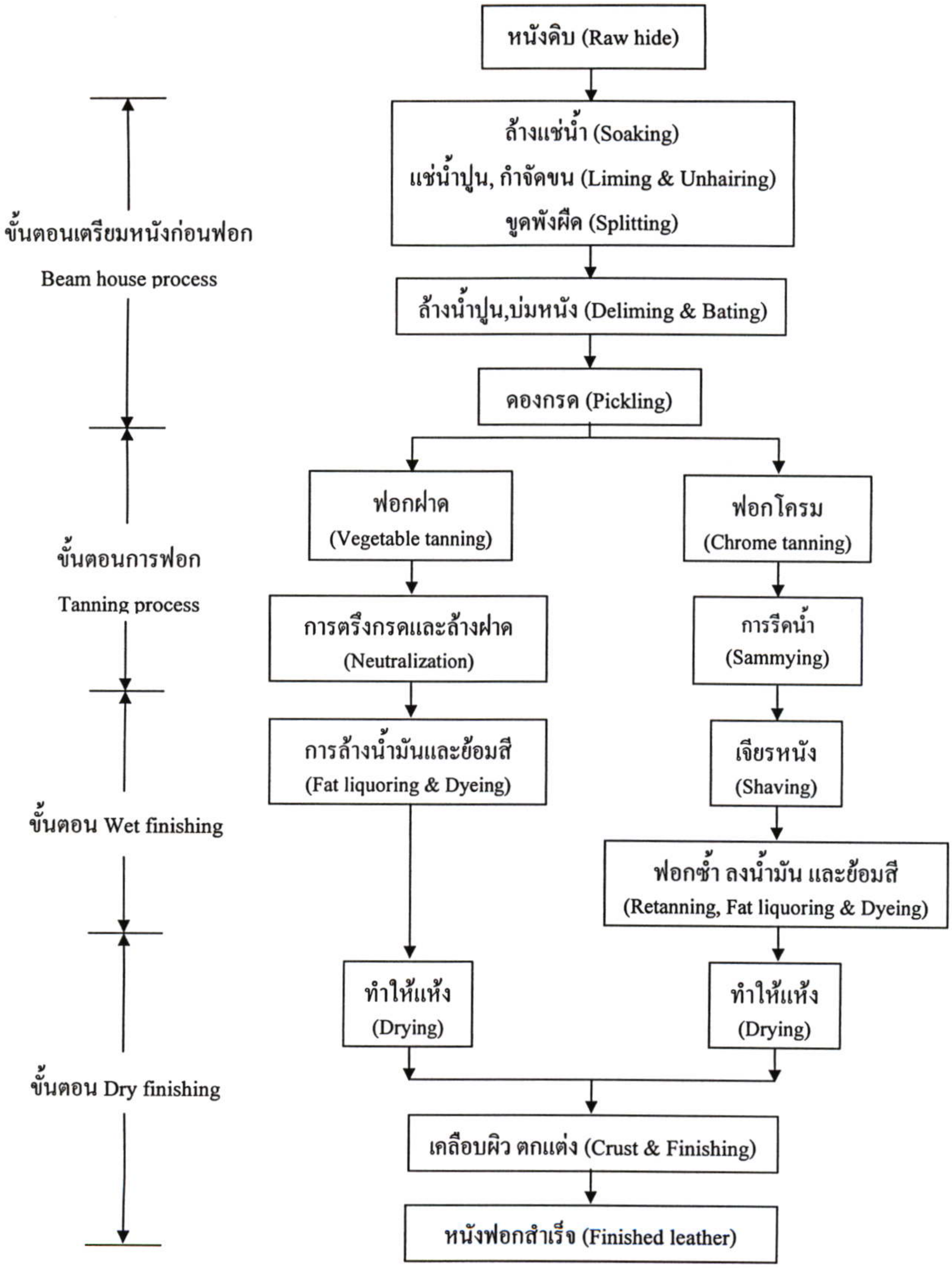
การตกแต่งนี้แบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอนหลักๆ คือ การฟอกทับ (Retannage) การย้อมสี (Dyeing) และการใส่น้ำมัน (Fat Liquoring)

การฟอกทับ (Retannage) เป็นการนำหนังเขียวที่ได้จากการฟอกโครมมาฟอกทับ เพื่อปรับปรุงคุณภาพหนังให้เหมาะสมกับความต้องการของตลาด สารที่ใช้ในการฟอกทับมีทั้งที่เป็นสารเคมี สารสกัดจากธรรมชาติและสารสังเคราะห์ หลังจากนั้นจะนำหนังที่ได้จากการฟอกทับนี้ไปทำการย้อมสี

สำหรับการฟอกฝาด (Vegetable Tanning) จะไม่มีการฟอกทับ แต่จะใช้กรดฟอร์มิกปรับสภาพหนังก่อน แล้วจึงนำไปทำการย้อมสีและตรึงสีให้ติดหนัง โดยมากมักใช้ไอน้ำทำให้หนังและน้ำย้อมสีร้อน

การใส่น้ำมัน (Fat Liquoring) ให้แก่หนังที่ได้จากการฟอกทั้ง 2 วิธี จะเป็นการทำให้หนังมีความอ่อนนุ่ม อยู่ตัว โดยอาจทำพร้อมกับการฟอกทับหรือการย้อมสี หรืออาจแยกทาต่างหากก็ได้ หนังที่ได้เรียกว่า หนังพื้น (Crust)

หนังพื้น (Crust) ที่ได้จากการฟอกทับทั้ง 2 กรรมวิธี เมื่อเสร็จจากขั้นตอนการย้อมสีและใส่น้ำมันจะต้องทำให้แห้ง โดยวิธีที่แตกต่างกันตามกรรมวิธีการฟอก คือ หนังที่ได้จากการฟอกฝาดจะทำการรีดน้ำ (Sammying) รีดหนังหมาด (Setting Out) ตากแห้ง (Drying) รีดหนัง (Rolling) และขัดมัน (Glazing) ส่วนหนังที่ได้จากการฟอกโครมจะมีขั้นตอนที่มากกว่า ได้แก่ การรีดน้ำ (Sammying) รีดหนังหมาด (Setting Out) อบแห้ง (Vacumm or Paste Drying) ทำให้ชื้น (Reconditioning) ทำให้นิ่ม (Staking) ผึ่งให้แห้ง (Toggle Dry) ขัดผิว (Buffing) จากรายละเอียดการฟอกทั้ง 2 วิธีจะนำหนังพื้นที่ได้มาทำการวัดขนาดก่อนออกสู่ตลาด โดยตกแต่งพ่นสี (Spraying coats) พิมพ์ลาย (Pad coats) และอื่นๆ เพื่อให้ตรงกับความต้องการของตลาด



รูปที่ 2.5 กระบวนการผลิตหนังสัตว์ฟอก [16]

2.4 ยางรีเคลม (Reclaimed rubber) [18, 19, 20]

ยางรีเคลมเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์ (Vulcanization) หรือยางใช้แล้ว เช่น ยางรถยนต์เก่า มาผ่านกระบวนการเชิงกลและความร้อนเพื่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างให้เหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นสารเติมแต่งในกระบวนการผลิตพลาสติกและยาง โดยพันธะคาร์บอน-คาร์บอนในพอลิเมอร์สังเคราะห์และยางธรรมชาติจะแตกตัว แต่จะไม่เกิดการแตกตัวของพันธะซัลเฟอร์ ทำให้ยางมีลักษณะเป็นสามมิติ และสายพอลิเมอร์ที่สั้นลงทำให้ความแข็งแรงดึงลดลง

ยางรีเคลมมีองค์ประกอบต่างๆ ได้แก่ ยางสังเคราะห์ (SBR, BR, Halo Butyl) ยางธรรมชาติ (NR) เขม่าดำ (Carbon black) รวมทั้งสารอื่นๆ เช่น ซัลเฟอร์ (Sulfur) เป็นต้น จึงสามารถใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตได้อีกครั้ง กระบวนการผลิตยางรีเคลม มีหลายกระบวนการดังนี้

2.4.1 กระบวนการย่อยละเอียด (Digester process)

ในกระบวนการนี้จะนำเศษยาง หรือยางใช้แล้วมาบดย่อยด้วยเครื่องตัดแบบหมุนให้เป็นชิ้นเล็กๆ ใช้เวลาบดประมาณ 24 ชั่วโมง เส้นลวดที่ผสมอยู่ในยางจะถูกแยกออกด้วยเครื่องแยกแบบสนามแม่เหล็ก จากนั้นผ่านเข้าเครื่องแยกขนาด ชิ้นยางที่มีขนาดใหญ่จะถูกคัดออกเพื่อส่งกลับเข้าเครื่องบดอีกครั้งหนึ่ง ชิ้นยางขนาดเล็กมีขนาดไม่เกิน 3/8 นิ้ว

จากนั้นนำยางที่เตรียมได้มาแช่ในสารละลายผสมที่มีน้ำและ Reclaiming agent ซึ่งประกอบไปด้วยน้ำมันหลากหลายชนิด เช่น น้ำมันหนัก/เบา น้ำมันทาร์จากต้นสน เป็นต้น ผสมอยู่ใน Steam-jacket ที่มีการปั่นกวนตลอดเวลา โดยมีหม้ออบไอน้ำ (Autoclave) ติดอยู่ในแนวตั้งหรือแนวนอน ในภายหลังจึงเปลี่ยนเป็นสารละลายด่างซึ่งช่วยกำจัดอนุภาคอิสระของซัลเฟอร์ออกไปและเป็นตัวสลายเส้นใยต่างๆ โดยสารละลายทั้งหมดจะถูกฉีดเข้าไปในท่อ แรงดันที่ใช้ 150-250 psi ใช้เวลา 5-24 ชั่วโมง ซึ่งระหว่างกระบวนการนี้ยางจะเกิดการดิวัลคาไนซ์และเส้นใยจะถูกไฮโดรไลซิส ขณะเดียวกันยางที่ได้จะถูกเป่าและล้างเพื่อกำจัดเส้นใยและโลหะคลอไรด์ออก

2.4.2 กระบวนการให้ความร้อน (Heater or Pan process)

กระบวนการนี้ทำได้ง่ายโดยการใช้เครื่องให้ความร้อนขนาดใหญ่ และมีหม้ออบไอน้ำติดตั้ง ยางที่ได้จากการเตรียมจะถูกผสมกับ Reclaiming agent ในเครื่องผสมและส่งต่อไปยังถังที่มีการหมุนตลอดเวลา สำหรับไอน้ำมีความดัน 100-200 psi อุณหภูมิ 170-210 องศาเซลเซียส และใช้เวลา 5-12 ชั่วโมง กระบวนการนี้เหมาะกับการผลิตยางรีเคลมจากเศษยางในซึ่งเป็นยางบิวทิล (Butyl rubber) และเศษยางที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำ

2.4.3 กระบวนการรีเคลมเมเตอร์ (Reclaimator process)

เป็นการใช้เครื่องอัดรีดและมีการควบคุมอุณหภูมิในแต่ละโซน ระหว่างตัวสกรูและผนังของช่องใส่สารจะถูกปิดสนิท โดยยางที่เตรียมได้จะถูกแยกโลหะและเส้นใยออกก่อน หลังจากนั้น

จึงถูกตัดเป็นอนุภาคที่มีความละเอียด ซึ่งจะใช้เวลาภายในเครื่องน้อยกว่า 5 นาทีและมีการควบคุมอุณหภูมิที่ 204-260 องศาเซลเซียส และความดันตลอดเวลา ในระหว่างนั้นยางจะเกิดการดิวัลคาไนซ์และถูกฉีดออกมารวมทั้งทำให้เย็นตามลำดับ โดยกระบวนการนี้เป็นแบบต่อเนื่อง (Continuous process)

2.4.4 กระบวนการไดนามิคดิวัลคาไนซ์ (Dynamic Devulcanization)

กระบวนการนี้เป็นการนำข้อดีของกระบวนการบดย่อยและการให้ความร้อนมาผสมผสานกัน โดยมีหม้ออบไอน้ำขนาดใหญ่วางในแนวนอนและมีการติดตั้งใบพัด ซึ่งยางจะถูกปั่นกวนมากในสภาวะที่แห้ง ไม่มีการล้างหรือการทำให้แห้ง ดังนั้นจึงไม่มีการสูญเสียยางบางส่วนออกไป

สำหรับข้อดีของการใช้ยางรีเคลม ได้แก่

- ลดต้นทุน
- เวลาที่ใช้ในการผสมลดลง ส่งผลให้อัตราการผลิตเพิ่มขึ้น
- เหมาะกับวัสดุที่ไม่ต้องการความต้านแรงดึงมากนัก
- ลดการบวม และหดตัวจากการรีด
- ลดและต้านทานการเกิดฝ้าของซัลเฟอร์ (Blooming)

สำหรับยางรีเคลมที่ผลิตได้ส่วนใหญ่จะนำไปใช้งานหลายประเภท เช่น

- ยางใน
- อุปกรณ์เครื่องกล
- ตัวช่วยยึดติด
- แอสฟัลท์ ฯลฯ

2.5 วัสดุเชิงประกอบ (Composite) [21, 22]

วัสดุเชิงประกอบเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมและมีการใช้งานกันอย่างมาก เนื่องจากมีสมบัติที่ดีหลายอย่างจึงมีการนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นวัสดุโครงสร้างและรับแรงสำหรับงานทางวิศวกรรม เช่น ชิ้นส่วนของเครื่องบิน เรือ อุปกรณ์กีฬา เป็นต้น ซึ่งวัสดุเชิงประกอบมีข้อดี เช่น มีความแข็งแรง แต่น้ำหนักน้อยเมื่อเทียบกับวัสดุอื่นๆ เช่น โลหะหรือเซรามิกส์ สามารถใช้งานได้นาน เป็นต้น

วัสดุเชิงประกอบ หมายถึง วัสดุที่ประกอบด้วยส่วนประกอบอย่างน้อย 2 ชนิด ที่มีสมบัติต่างกัน โดยจะแยกกันอยู่คนละวัฏภาคและทำให้ได้วัสดุที่มีสมบัติที่ดีขึ้น โดยทั่วไปจะนิยมทำเพื่อปรับปรุงความแข็งแรง มอดุลัส ความเสถียรทางรูปร่าง และลดความหนาแน่น เป็นต้น สำหรับวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์จะประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆ ได้แก่ ส่วนโครงสร้าง หรือเมทริกซ์ (Matrix phase) และส่วนเสริมแรง (Reinforcement phase)

2.5.1 ส่วนโครงสร้าง หรือเมทริกซ์ (Polymer matrix)

เมทริกซ์เป็นวัสดุที่ช่วยห่อหุ้มและยึดส่วนเสริมแรงเข้าไว้ด้วยกัน ให้อยู่ในตำแหน่งและการเรียงตัวที่กำหนด โดยจะล้อมรอบและปกป้องส่วนเสริมแรงจากการเสียสภาพเนื่องจากสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิสูง ความชื้น ฯลฯ มักจะมีความเหนียวสูง ความแข็งแรงและมอดุลัสต่ำกว่าส่วนเสริมแรง เมทริกซ์เป็นองค์ประกอบที่มีความต่อเนื่องจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางถ่ายเทแรงที่ได้รับ (Load transfer medium) ไปสู่ส่วนเสริมแรง เมทริกซ์ที่นิยมใช้ในปัจจุบันได้แก่

- พอลิเมอร์ เรียกวัสดุเชิงประกอบนี้ว่า Polymer Composites
- โลหะ เรียกวัสดุเชิงประกอบนี้ว่า Metal Composites
- เซรามิกส์ เรียกวัสดุเชิงประกอบนี้ว่า Ceramic Composites

ซึ่งในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงพอลิเมอร์เมทริกซ์เท่านั้น โดยทั่วไปแล้วพอลิเมอร์เมทริกซ์แบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่

<u>เทอร์โมเซต</u> (Thermoset) พอลิเมอร์กลุ่มนี้เมื่อผ่านกระบวนการวิธีผลิตจะมีรูปทรงถาวร ผลิตผลที่ได้นำไปหลอมขึ้นรูปใหม่อีกไม่ได้ และไม่ละลายในตัวทำละลาย คือ ไม่เกิดกระบวนการย้อนกลับ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากก่อนผ่านกระบวนการโครงสร้างของพอลิเมอร์ยังไม่เป็นร่างแห แต่เมื่อผ่านกระบวนการให้ความร้อน หรือความดันเข้าไปจะมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในการเกิดการเชื่อมโยง (Crosslinking) ระหว่างสายโซ่โมเลกุลทำให้ผลิตผลที่ได้มีความคงทนไม่หลอมละลาย ถ้าให้ความร้อนมากๆ จะไหม้เกรียม และสมบัติเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

เทอร์โมเซตที่ใช้เป็นเมทริกซ์ส่วนใหญ่ ได้แก่ อิพอกซี พอลิเอสเทอร์ และไวนิลเอสเทอร์ เมื่อเทอร์โมเซตเรซินที่หลอมเหลวเริ่มแข็งตัวจะเกิดการเชื่อมโยงเกิดขึ้น ซึ่งทำให้เกิดรอยต่อที่แน่นอนของโครงสร้างสามมิติ การเกิดการเชื่อมโยงจะทำให้พอลิเมอร์แข็งตัว มีความแข็งแรงสูง มีความต้านทานต่อสารละลาย มีความเสถียรทางความร้อนและต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน สมบัติเหล่านี้จะสัมพันธ์โดยตรงกับความหนาแน่นของการเกิดการเชื่อมโยง และน้ำหนักของสายโซ่ระหว่างการเชื่อมโยง ถ้าเกิดการเชื่อมโยงมากจะส่งผลให้เมทริกซ์มีความแข็งมาก หรือมีมอดุลัสยืดหยุ่นสูง แต่ถ้าเกิดการเชื่อมโยงมากแล้วน้ำหนักการเชื่อมโยงจะลดลง ซึ่งจะทำให้การเคลื่อนที่ของโมเลกุลเกิดขึ้นได้ยาก เกิดความเปราะ มีความเครียดต่ำ และมีความต้านแรงกระแทกต่ำ

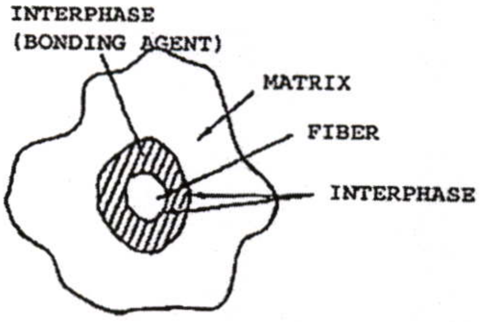
<u>เทอร์โมพลาสติก</u> (Thermoplastic) จะละลายได้ดีในตัวทำละลายบางชนิด เมื่อถูกความร้อนสามารถหลอมตัวได้ เมื่อเย็นลงจะเกิดการแข็งตัว สามารถหลอมและแข็งตัวหลายๆ ครั้งโดยไม่ทำให้สมบัติทางเคมีเปลี่ยนแปลงไป สามารถแยกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มเทอร์โมพลาสติก อสัณฐาน และเทอร์โมพลาสติกที่มีบางส่วนเป็นผลึก

เทอร์โมพลาสติกไม่จำเป็นต้องทำให้เกิดการเชื่อมโยงก่อนการใช้งาน ดังนั้นความแข็งแรงเป็นผลโดยตรงจากสมบัติของหน่วยซ้ำหรือมอนอเมอร์และน้ำหนักโมเลกุลที่สูง เทอร์โมพลาสติกอสัณฐานมีการพันกันของสายโซ่โมเลกุลซึ่งส่งผลคล้ายกับเกิดการเชื่อมโยง และในพอลิ

เมอร์ที่สามารถตกผลึกได้ก็จะมีการจัดเรียงตัวที่ดีทำให้เมทริกซ์มีความแข็งแรง สมบัติของเทอร์โมพลาสติกขึ้นอยู่กับองศาความเป็นผลึก สัณฐานวิทยา การจัดเรียงตัวของผลึก ซึ่งขึ้นกับสภาวะในการผลิต ตัวอย่างเทอร์โมพลาสติก เช่น พอลิเอทิลีน พอลิพรอพิลีน เป็นต้น

สำหรับหน้าที่ของเมตริกซ์ในพอลิเมอร์คอมโพสิต ดังรูปที่ 2.6 ได้แก่

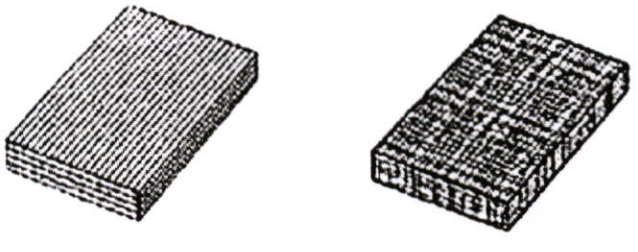
- รักษาความเสถียรในรูปร่างและขนาดของวัสดุเชิงประกอบ
- รักษาการกระจายตัวของเส้นใยและแยกไม่ให้เส้นใยมารวมกัน
- ทำให้วัสดุเชิงประกอบสามารถทนต่อการเสียสภาพ ภายใต้อุณหภูมิหรือแรงกระทำระดับหนึ่ง
- สามารถกระจายหรือส่งถ่ายแรงที่ได้รับจากภายนอกไปยังเส้นใยได้
- ช่วยให้ทนทานต่อสภาพแวดล้อมและมีความเสถียรในตัวกลางต่างๆ



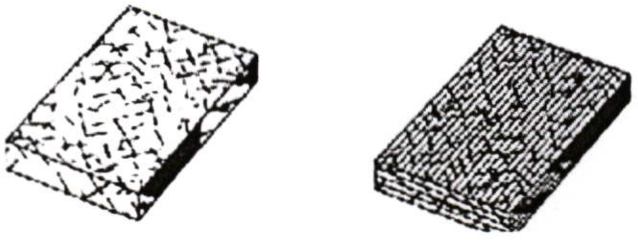
รูปที่ 2.6 การยึดติดระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ [23]

2.5.2 ส่วนเสริมแรง (Reinforcement phase)

ส่วนเสริมแรงเป็นส่วนประกอบที่ให้ความแข็งแรงแก่วัสดุเชิงประกอบ วัสดุที่จะเป็นส่วนเสริมแรงนั้นจะมีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง มีลักษณะรูปร่างได้หลายแบบอาจเป็นเส้นใย (Fibers) ผง (Particulate) และเป็นแผ่น (Lamina) ส่วนเสริมแรงที่นิยมใช้มีลักษณะเป็นเส้นใย (Fibers) อาจเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่อง (Continuous fibers) หรือเส้นใยสั้นที่พันกันอยู่ในรูปของเส้นใยที่ผ่านการถัก (Knitting) หรือการทอ (Weaving) มาแล้ว เช่น เส้นใยเคลฟลาร์ เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน หรือเส้นใยธรรมชาติต่างๆ เช่น เส้นใยเซลลูโลส เส้นใยไหม เป็นต้น ทำให้วัสดุเชิงประกอบมีโครงสร้างและมีการจัดเรียงตัวของส่วนเสริมแรงหลายรูปแบบ ดังรูปที่ 2.7



(a) Continuous fiber composite (b) Woven fiber composite



(c) Chopped fiber composite (d) Hybrid composite

รูปที่ 2.7 ตัวอย่างวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนเสริมแรงที่ต่างกัน [23]

คุณสมบัติที่ดีของสารตัวเติมเสริมแรง คือ

- ปราศจากสารเจือปนและความชื้น และไม่เป็นพิษ
- เฉื่อย ไม่ละลายและมีเสถียรภาพทางความร้อน
- กระจายตัวในพอลิเมอร์ได้ง่าย
- ระหว่างกระบวนการขึ้นรูป โครงสร้างและสมบัติไม่เปลี่ยนแปลง
- การกระจายของอนุภาคสม่ำเสมอ

โดยทั่วไปสารตัวเติมเสริมแรง แต่ละชนิดมีด้วยกันหลายเกรด ขึ้นกับสมบัติดังนี้

- ขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ย (Average particle size) และการกระจายขนาดของอนุภาค (Size distribution)
- รูปร่างของอนุภาคและความพรุน (Particle shape and porosity)
- สารเจือปน (Impurities)
- ธรรมชาติทางเคมีที่พื้นผิว (Chemical nature of the surface)

คุณสมบัติของเส้นใยที่เหมาะสำหรับใช้เสริมแรงควรมีลักษณะดังนี้

- เส้นใยควรจะมีความแข็งแรงและมอดุลัสยืดหยุ่นสูง เพื่อประสิทธิภาพในการเสริมแรง
- ความแข็งแรงของเส้นใยแต่ละเส้นไม่ควรแตกต่างกันมาก
- เส้นใยควรจะเสถียรและรับแรง ขณะจัดเก็บและขึ้นรูปได้
- เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยควรมีค่าใกล้เคียงกัน
- พื้นผิวของเส้นใยควรมีลักษณะเหมือนกัน

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

โดยปัจจัยสำคัญของเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติและโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบคือ

- การยึดเกาะระหว่างเมทริกซ์และเส้นใยเสริมแรง
- คุณสมบัติของเมทริกซ์และเส้นใยเสริมแรง
- ขนาดและรูปร่างของเส้นใยเสริมแรง
- ปริมาณเส้นใยเสริมแรง
- การเรียงตัวหรือการกระจายตัวของเส้นใยเสริมแรง
- เทคนิคการขึ้นรูป

2.5.3 สารเติมแต่ง (Additives) [24, 25, 26]

สารเสริมแรงหากขาดการยึดติดที่ดีระหว่างสารตัวเติมกับพอลิเมอร์ โดยเฉพาะบริเวณพื้นผิวหน้าจะไม่สามารถให้ประสิทธิภาพสูงสุดได้และส่งผลให้สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบเสียไป การปรับปรุงการยึดระหว่างสารตัวเติมเสริมแรงกับพอลิเมอร์นี้ นอกจากการใช้สารปรับแต่งพื้นผิวแล้ว ยังอาจใช้สารเติมแต่งอีกประเภทหนึ่งคือ สารคู่ควบ (Coupling agents) สารคู่ควบที่ใช้กันโดยทั่วไป เช่น ไซเลน (Silane) เป็นต้น เพื่อเป็นตัวกลางเชื่อมระหว่างพอลิเมอร์กับสารตัวเติมหรือเส้นใยเสริมแรง โดยการสร้างพันธะที่แข็งแรงกับทั้งสองเฟส ทำให้มีการยึดเกาะระหว่างเฟสที่ดีขึ้น ซึ่งการใช้สารคู่ควบนั้นมี 2 วิธี คือ

- การนำไปเคลือบหรือปรับที่พื้นผิวของสารตัวเติมหรือเส้นใยเสริมแรง แล้วจึงนำไปผสมกับพอลิเมอร์
- การนำไปผสมกับพอลิเมอร์โดยตรงระหว่างกระบวนการคอมพาวด์

นอกเหนือไปจากนี้ยังมีการใช้สารเติมแต่งที่ใส่ในพอลิเมอร์ เพื่อเสริมให้พอลิเมอร์มีสมบัติที่ดีขึ้นและคงทนต่อการใช้งาน หรือช่วยให้กระบวนการผลิตได้ง่ายขึ้น รวมทั้งยังใส่เพื่อลดต้นทุนในการผลิต โดยสารเติมแต่งนั้นมีทั้งสารประกอบอินทรีย์และสารประกอบอนินทรีย์ ซึ่งถ้าจำแนกตามหน้าที่การทำงานจะแบ่งได้ดังนี้

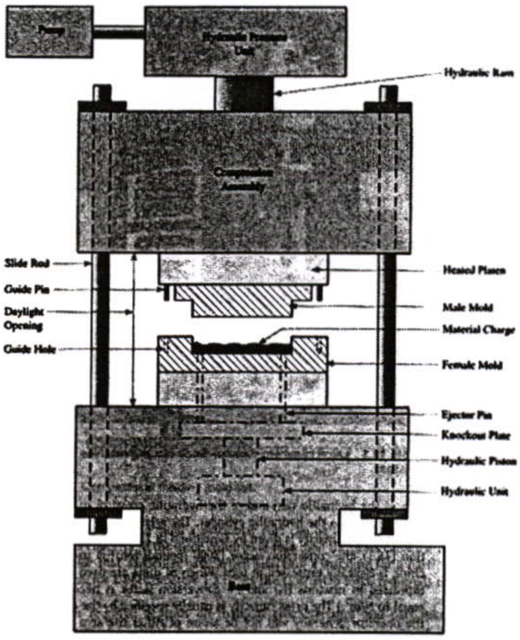
- สารปรับปรุงสมบัติเชิงกล ได้แก่ สารตัวเติม เส้นใยเสริมแรง สารก่อผลึก พลาสติไซเซอร์
- สารปรับปรุงสมบัติทางเคมี ๆ ได้แก่ สารป้องกันการเกิดออกซิเดชัน สารเพิ่มความเสถียรต่อแสงยูวี สารหน่วงไฟ สารกันจุลินทรีย์
- สารปรับปรุงกระบวนการผลิตได้แก่ สารเชื่อมโยง สารเกิดฟอง สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน
- สารปรับปรุงเพื่อเพิ่มความสวยงาม ได้แก่ สารให้สี สารให้กลิ่น สารก่อผลึก สารกันจุลินทรีย์

65454

- สารปรับปรุงสมบัติที่พื้นผิว ได้แก่ สารกันติด สารคู่ควบ สารป้องกันไฟฟ้าสถิตย์ สารทำให้ลื่น

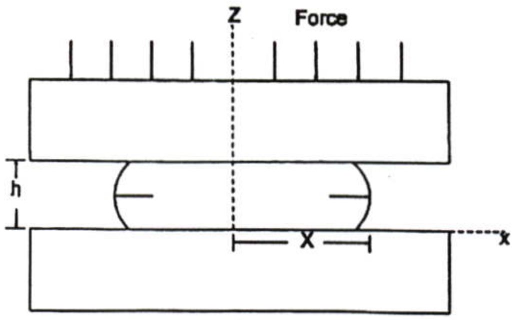
2.6 การขึ้นรูปแบบอัดด้วยแม่พิมพ์ (Compression molding) [27, 28]

สำหรับกระบวนการนี้ส่วนใหญ่นิยมใช้กับพลาสติกประเภทเทอร์โมเซต (Thermosetting) หรือเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ที่ขึ้นรูปยาก โดยพอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นแผ่น (Sheet) เม็ด (Pellet) หรือผง (Powder) จะถูกวางบนแม่พิมพ์ โดยวัสดุที่มีลักษณะเป็นแผ่น เรียกว่า แบลงค์ (Blank) แต่ถ้ามีเส้นใยเสริมแรง เรียกว่า พรีพรีก (Prepreg) โดยกรณีที่เป็น Blank จะถูกให้ความร้อนก่อนนำไปวางบนแม่พิมพ์เพื่อขึ้นรูป ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า Blank แต่กรณีที่เป็น Prepreg จะวางอยู่บนแม่พิมพ์และมีการให้ความร้อนอย่างช้าๆ โดยแม่พิมพ์ถูกอัดโดยใช้ความดันไฮโดรลิก (Hydrolic pressure) เพื่อประกบแม่พิมพ์ รวมทั้งมีการหล่อเย็น (Cooling)ในแม่พิมพ์เดียวกัน ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 เครื่องขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์อัด [27]

ในกระบวนการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติก การไหลของพลาสติกจะไม่เหมือนกับระบบอื่นๆ โดยวัสดุที่มีลักษณะเป็นเม็ด (Granular) จะไม่เกิดการไหลแต่จะหลอมออกไปภายใต้ความดัน ดังรูปที่ 2.9 โดยกรณีที่มีการเติมสารเสริมแรง เช่น เส้นใยลงไปจะมีการกดแม่พิมพ์ซ้ำ ซึ่งการไหลที่เกิดขึ้นจะน้อยกว่ากระบวนการขึ้นรูปแบบอัดฉีด (Injection molding)



รูปที่ 2.9 ลักษณะการไหลของพลาสติก [27]

โดยเวลาที่ใช้ในการเติมพอลิเมอร์จนเต็มแม่พิมพ์อาจใช้เวลาไม่กี่วินาที แต่อาจจะใช้เวลาในการหล่อเย็นนาน ซึ่งในช่วงการผิดรูป (Deformation process) อุณหภูมิในชิ้นงานตัวอย่างจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยสามารถดูได้จากสมการ [27]

$$F = 8W\mu\dot{h}X^3/h^3 \quad (2.1)$$

โดยที่ F คือ แรงที่ใช้ในการกดแม่พิมพ์

W คือ ความกว้างของแม่พิมพ์

μ คือ ความหนืด

$\dot{h}$ หรือ dh/dt คือ อัตราการกดอัด

X คือ ความยาวครึ่งหนึ่งของแม่พิมพ์

h คือ ความหนาของแม่พิมพ์

สิ่งที่ต้องคำนึงในกระบวนการนี้ คือ

- ปริมาณของพอลิเมอร์ที่ใช้
- อุณหภูมิ เวลาที่ใช้ให้ความร้อนและเทคนิคการให้ความร้อน
- แรงกดที่ใช้
- อุณหภูมิในช่วงการหล่อเย็น

ปัญหาที่ไม่สามารถจัดการได้ในกระบวนการ เช่น

- ลักษณะการไหลแบบวิสโคอิลาสติก(Viscoelastic) มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง
- สมบัติการไหลที่ไม่สามารถระบุได้

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

รัชดา ขวัญตน [29] ได้ทำการศึกษาวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเอทิลีนจากขวดน้ำดื่มและเส้นใยอ้อย โดยทำการเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุเชิงประกอบด้วยสารช่วยยึดติด 2 ชนิด คือ พอลิเอทิลีนกราฟท์อะคริลิกแอซิด (PE-g-AA) และพอลิเอทิลีนกราฟท์มะลิอิกแอนไฮไดรด์ (PE-g-MAH) พบว่าการเติมเส้นใยอ้อยลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มจะทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งขึ้น แต่การดึงยืดและความต้านแรงกระแทกลดลง และการคัดขนาดเส้นใยอ้อยไม่มีผลต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ เมื่อเปรียบเทียบวัสดุเชิงประกอบที่ใช้สารยึดติด PE-g-AA และ PE-g-MAH พบว่าไม่แตกต่างกันเนื่องจากเกิดพันธะชนิดเดียวกัน

Rathanawan Magaraphan และคณะ [30] ได้ทำการศึกษาการผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและพอลิไวนิลคลอไรด์ โดยการทำให้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเป็นโมเลกุลที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งใช้เมทิลเมธาอะคริเลต (MMA) และมีไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (DCP) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาได้ออกมาเป็น MMA-g-HDPE แล้วจึงผสมกับพอลิไวนิลคลอไรด์หรือเส้นใยไหม โดยความยืดหยุ่นของวัสดุเชิงประกอบ (HDPE/PVC/MMA)นั้นสูงขึ้นตามปริมาณพอลิไวนิลคลอไรด์และสัดส่วนของไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ต่อเมทิลเมธาอะคริเลต สำหรับการผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับเส้นใยไหมแบบ one-pot นั้นให้ผลดีกว่าแบบสองขั้นตอนที่เป็นการนำพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและเมทิลเมธาอะคริเลตกับไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ผสมในเครื่องผสม ก่อนที่จะนำมาผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและเส้นใยไหมอีกครั้งในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่

P.K. Pramanik และ W.E. Baker [31] ศึกษาความต้านแรงกระแทกของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำแบบเชิงเส้นผสมกับผงยางรถยนต์ขนาด 40 และ 80 เมช ที่ใช้เอทิลีนอะคริลิกแอซิด และยางธรรมชาติแบบอิพอกซิไดซ์ (Epoxidised natural rubber) เป็นสารช่วยผสมเพื่อปรับปรุงสมบัติความต้านแรงกระแทก จากการศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณของยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์เพิ่มขึ้น เมื่อผงยางรถยนต์มีขนาดเล็กลง ความต้านแรงกระแทกจะเพิ่มขึ้น และการเติมไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide) หรือการเคลือบผงยางรถยนต์ด้วยไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์และไตรแอริลไซยานูเรต (Triallyl cyanurate) จะช่วยเพิ่มความต้านแรงกระแทก

H. Demir และคณะ [32] ศึกษาผลของการปรับสภาพผิวของเส้นใยต่อสมบัติความต้านแรงดึง และสมบัติการดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบ PP/luffer fiber (LF) โดยใช้สารประสานคู่ควบเปรียบเทียบกัน 3 ชนิด ได้แก่ 3-อะมิโนโพรพิลไตรไอทอกซีไซเลน (AS) 3-ไตรเมทอกซีไซลิล1-โพรเพนไทออล (MS) และมะลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน (MAPP) วัสดุเชิงประกอบที่ใช้ LF 2-15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าวัสดุเชิงประกอบมีความต้านแรงดึงเพิ่มขึ้น ตามปริมาณ LF แต่การดูดซับน้ำลดลง ซึ่งเกิดจากการยึดติดที่ดีขึ้นระหว่างผิวของ PP และ LF โดยการยึดติดระหว่าง PP และ LF เมื่อใช้ MS ให้การยึดติดที่ดีกว่าการใช้ AS และ MAPP ตามลำดับ

P.J. Herrera-Franco และ A. Valadez-Gonza´lez [33] ศึกษาระดับการยึดติดระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ และผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ โดยมีการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วยอัลคาไลน์ โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร การปรับปรุงด้วยสารละลายผสมของ HDPE และไซลีน รวมทั้งปรับปรุงด้วยสารคู่ควบไซเลน โดยแช่เส้นใยในสารละลายไซเลนที่เตรียมได้จากการผสมไซเลนในสารละลายผสมน้ำและเมทานอล เป็นเวลา 20 นาที และทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือที่ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งการใช้ไซเลนจะทำให้เกิดพันธะ Si-O-Cellulose และ Si-O-Si บนพื้นผิวของเส้นใย โดยความต้านแรงดึงจากการใช้ไซเลนและใช้สารละลายผสมของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและไซลีนมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ไม่มีผลต่อมอดุลัสการยึดซึ่งความต้านแรงดัดโค้งมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ไม่มีผลต่อมอดุลัสยืดหยุ่นเฉพาะการปรับปรุงด้วยไซเลนเท่านั้น

A. Krysztafkiewicz และคณะ [34] ศึกษาการใช้อะมิโนไซเลนปรับปรุงซิลิกาโดยใช้เทคนิค 2 แบบคือ แบบเปียก และแบบแห้ง โดยเทคนิคแบบเปียกจะผสมซิลิกา (EG-SILICA) กับไซเลนโดยตรง เพื่อรอให้เกิดการตกตะกอนเป็นเวลา 20 นาที ส่วนเทคนิคแบบแห้งจะผสมซิลิกา (SYLOID 244) กับไซเลน และนำไปผสมกับสารละลายไซเลนที่เตรียมได้จากการนำไซเลนผสมกับน้ำต่อเมทานอล (4 ต่อ1) และทำให้แห้ง พบว่าหลังการปรับปรุงซิลิกาด้วยไซเลนปริมาณเท่ากัน ซิลิกา (SYLOID 244) และซิลิกา (EG-SILICA) มีความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobization) 35.5% และ 22.6% ตามลำดับ รวมทั้งโครงสร้างของซิลิกามีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้น

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้เป็นการนำวัสดุเหลือใช้พอลิเอทิลีนและผงหนังเพื่อมาผลิตเป็นวัสดุเชิงประกอบสำหรับใช้ทดแทนไม้หมอนรางรถไฟ ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งมีลำดับขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

- ขวดน้ำพอลิเอทิลีนที่ใช้แล้ว (Used polyethylene bottles)
- ยางรีเคลมขนาด 40 mesh (Reclaimed rubber)
- หนังสัตว์ฟอก (Leather)
- 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (3-Aminopropyl-triethoxysilane)
- เอ็น-อะมิโนเอทิล 3-อะมิโนโพรพิลเมทิลไดเมทอกซีไซเลน (N-aminoethyl-3-aminopropyl methyldimethoxysilane)
- ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide)
- เมทานอล (Methanol)

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

- เครื่องบดพลาสติก
- เครื่องบดหนังสัตว์ฟอก
- เครื่องแยกขนาด (Seiveing tester)
- เครื่องผสมแบบลูกกลิ้งสองลูก (Two roll mills) อัตราการหมุนของลูกกลิ้งหน้าและหลัง 16 และ 19.2 รอบต่อนาที ตามลำดับ
- เครื่องขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์อัด (Compression molding)
- แม่พิมพ์ขนาด 120 x 120 x 3 มิลลิเมตร
- เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analyzer)
- เครื่องทดสอบความทนทานต่อการกระแทก (Impact tester)
- เครื่องทดสอบความทนทานต่อการดัดโค้ง (Flexural tester)
- เครื่องวัดความแข็งแบบ Shore D (Durometer hardness testing)
- เครื่องกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเลต

3.3 ศึกษาสมบัติเบื้องต้นของพอลิเอทิลีนที่ใช้แล้วและผงหนัง

ในการศึกษาสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

3.3.1 ศึกษาสมบัติวัสดุเหลือใช้พอลิเอทิลีน

นำขวดน้ำพอลิเอทิลีนที่ใช้แล้ว จากร้านรับซื้อขยะและของเก่า นำมาทำความสะอาดแล้วจึงบดด้วยเครื่องบดพลาสติก ให้อยู่ในรูปของชิ้นเล็กๆ และนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน โดยทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM ประกอบไปด้วยการหาความหนาแน่น ความต้านแรงดึง ความต้านแรงดัดโค้งและมอดุลัสยืดหยุ่น ความแข็งแบบ Shore D และความต้านแรงกระแทก

3.1.2 ศึกษาสมบัติผงหนัง

การนำผงหนังจากโรงงานฟอกหนังบดด้วยเครื่องบดหนัง ด้วยอัตราประมาณ 10 กรัมต่อนาที จากนั้นวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดผงหนังด้วยเครื่องแยกขนาด (Seiveing tester) ที่ใช้ตะแกรงคัดขนาดต่างๆ กัน และศึกษาสัณฐานวิทยาของผงหนังด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รวมทั้งตรวจสอบความชื้นและอุณหภูมิการสลายตัวด้วยเครื่องวิเคราะห์สมบัติความร้อน (TGA)

3.4 ศึกษากระบวนการผลิตวัสดุเชิงประกอบ

เป็นการศึกษาเวลาที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ ด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์อัด การทดลองนี้ได้ผสมพอลิเอทิลีน ผงหนังและยางรีเคลมที่เตรียมไว้ด้วยเครื่องผสมแบบลูกกลิ้งสองลูก โดยผสมตัวอย่างละ 600 กรัม ควบคุมอุณหภูมิของลูกกลิ้งที่ 200 องศาเซลเซียส ขณะผสมต้องตัดและพลิกกลับวัสดุตลอดเวลาเพื่อช่วยวัสดุผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันเร็วขึ้น ใช้เวลาผสมตัวอย่างละประมาณ 20 นาที จากนั้นตั้งระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 3.5 มิลลิเมตร แล้วรีดวัสดุออกจากลูกกลิ้ง จะได้แผ่นวัสดุที่ผสมเข้ากันดีแล้ว บรรจุลงแม่พิมพ์และอัดด้วยอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความดัน 1100 psi เป็นเวลา 3 4 5 และ 6 นาที ตามลำดับ ณ อุณหภูมินี้ พอลิเอทิลีนจะหลอมและไหลเต็มแม่พิมพ์ เมื่อถอดออกจากแม่พิมพ์แล้ว จะได้แผ่นวัสดุเชิงประกอบที่มีความหนา 3 มิลลิเมตร ความยาว 120 มิลลิเมตร ความกว้าง 120 มิลลิเมตร

การวิจัยนี้ใช้ผงหนังขนาด 5-7 mesh เป็นปริมาณ 90 phr และยางรีเคลม 25 phr และทดสอบสมบัติของวัสดุเชิงประกอบตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM ซึ่งประกอบไปด้วยการหาความหนาแน่น ความแข็งแบบ Shore D ความต้านแรงดัดโค้ง มอดุลัสยืดหยุ่น ความต้านแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งในการศึกษาปัจจัยอื่นๆ จะใช้เวลาในการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองนี้

3.5 ศึกษาผลกระทบของขนาดและปริมาณผงหนังที่มีต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ

จากการศึกษาการกระจายของขนาดผงหนังในข้อ 3.3.2 จึงนำผงหนัง 2 ขนาด คือ 5-7 mesh และ 20-29 mesh มาทำการวิเคราะห์ผลกระทบจากขนาดและปริมาณผงหนังที่มีต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ โดยผสมด้วยเครื่องผสมแบบลูกกลิ้งสองลูกตัวอย่างละ 600 กรัม ควบคุมอุณหภูมิของลูกกลิ้งที่ 200 องศาเซลเซียส ขณะผสมต้องตัดและพลิกกลับวัสดุตลอดเวลา เพื่อช่วยวัสดุผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันเร็วขึ้น ใช้เวลาผสมตัวอย่างละประมาณ 20 นาที และขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์อัด ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความดัน 1100 psi ใช้เวลาในการขึ้นรูปที่วิเคราะห์ได้จากหัวข้อ 3.4 ซึ่งอัตราส่วนของวัสดุที่ใช้ดังตารางที่ 3.1

การทดสอบสมบัติของวัสดุเชิงประกอบตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM ซึ่งประกอบไปด้วยการหาความแข็งแบบ Shore D ความต้านแรงดัดโค้ง มอดุลัสยืดหยุ่น ความต้านแรงกระแทก และสัณฐานวิทยา โดยนำขนาดและปริมาณผงหนังที่เหมาะสมไปใช้ในการศึกษาผลกระทบของปริมาณยางรีเคลมต่อไป

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนของวัสดุที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของขนาดและปริมาณผงหนัง

PE	ขนาดผงหนัง (mesh)	ปริมาณ (phr)	
		ผงหนัง	ยางรีเคลม
100	5-7	10 30 50 70 และ 90	15
	20-29		

3.6 ศึกษาผลกระทบของปริมาณยางรีเคลมที่มีต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ

ในงานส่วนนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของปริมาณยางรีเคลมที่มีต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ วิธีการดำเนินงานวิจัยเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.5 โดยขนาดและปริมาณผงหนังที่ใช้ในการวิจัยได้จากการวิเคราะห์ในหัวข้อ 3.5 เช่นกัน สำหรับอัตราส่วนที่ใช้ในงานวิจัยดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนของวัสดุที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของปริมาณยางรีเคลม

PE	ขนาดผงหนัง (mesh)	ปริมาณ (phr)	
		ผงหนัง	ยางรีเคลม
100	5-7	70	5 10 15 20 และ 25

3.7 ศึกษาประสิทธิภาพและปริมาณสารคู่ควบไซเลนที่ใช้ปรับปรุงพื้นผิวของผงหนัง

ในการศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวของผงหนังด้วยสารคู่ควบประเภทออร์กาโนไซเลน 2 ชนิด คือ 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (3-Aminopropyl-triethoxysilane, A) และเอ็น-อะมิโนเอทิล-3-อะมิโนโพรพิลเมทิลไดเมทอกซีไซเลน (N-aminoethyl-3-aminopropylmethyldimethoxy-silane, B) ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้ [33, 34]

- การนำผงหนังที่ผ่านการคัดขนาดจากหัวข้อ 3.5 อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- จากนั้นเตรียมสารละลายไซเลน A 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยนำไซเลน A 1 กรัม ต่อน้ำหนักผงหนัง 100 กรัม ละลายในตัวทำละลายผสมคือน้ำและเมทานอลในอัตราส่วน 4 ต่อ 1 โดยปริมาตร ซึ่งการเตรียมสารละลายไซเลน B ทำการเตรียมเช่นเดียวกัน
- แช่ผงหนังที่ผ่านการอบไล่ความชื้น ในสารละลายที่เตรียมได้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาทีโดยควบคุม pH ของสารละลายให้อยู่ที่ 3.5
- นำไปอบเพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นเก็บในเดซิเคเตอร์
- นำผงหนังที่ผ่านการปรับสภาพด้วยไซเลนผสมพอลิเอทิลีนที่ใช้แล้วและยางรีเคลม มีอัตราส่วนดังตารางที่ 3.3 โดยขึ้นรูปเช่นเดียวกันกับหัวข้อ 3.5 และทดสอบสัณฐานวิทยา การปรากฏหมู่ฟังก์ชันด้วยอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี รวมทั้งทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนของวัสดุที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพและปริมาณสารคู่ควบไซเลนที่ใช้ปรับปรุงพื้นผิวของผงหนัง

PE	ขนาดผงหนัง (mesh)	ปริมาณ (phr)		ชนิดไซเลน	ปริมาณไซเลน (wt%)
		ผงหนัง	ยางรีเคลม		
100	5-7	70	20	A	1 2 3 4 และ 5
				B	

3.8 ศึกษาผลกระทบของปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ

สำหรับการศึกษาการใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ เพื่อปรับปรุงความเสถียรของวัสดุเชิงประกอบในสภาวะแวดล้อม โดยทดสอบในสภาวะที่มีการเร่งสภาพแวดล้อม (Accelerated weathering) ใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์แบบ UVB-313 เป็นไปดังมาตรฐาน ASTM G154-00a$^{\varepsilon 1}$ ประกอบด้วยการให้รังสี 8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และมีการให้ละอองน้ำเป็นเวลา

4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดยทำการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุเชิงประกอบก่อนและหลังจากการให้รังสีเป็นเวลา 100 200 และ 300 ชั่วโมง ตามลำดับ สำหรับอัตราส่วนของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนของวัสดุที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์

PE	ขนาดผงหนัง (mesh)	ปริมาณ (phr)		ปริมาณ TiO_2 (phr)
		ผงหนัง	ยางรีเคลม	
100	5-7	70	20	1 3 และ 5

3.9 การทดสอบสมบัติต่างๆ ของวัสดุเชิงประกอบ

ในการวิเคราะห์ข้อมูลซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการวิจัย จะนำมาหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลโดยใช้การคำนวณดังนี้

$$\overline{X} = \frac{\sum_{i=1}^{n} Xi}{n} \tag{3.1}$$

เมื่อ $\overline{X}$ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูล

Xi คือ ข้อมูล

n คือ จำนวนข้อมูล

3.9.1 การหาความหนาแน่น [35]

การหาความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบ นำชิ้นงานมาชั่งน้ำหนักและวัดขนาด จากนั้นคำนวณความหนาแน่นของชิ้นงาน จากสมการ

$$\text{ความหนาแน่น} = \frac{\text{น้ำหนักสารตัวอย่าง}}{\text{ปริมาตรสารตัวอย่าง}} \tag{3.2}$$

3.9.2 การหาความชื้น [35]

การหาความชื้นของสารตัวอย่าง นำภาชนะที่บรรจุสารตัวอย่างไปชั่งอย่างละเอียด แล้วจึงนำไปอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 70 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำไปเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 2 ชั่วโมงและชั่งน้ำหนัก ทำซ้ำเช่นนี้อีกจนน้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลง โดยสามารถหาความชื้นได้จากสมการ [35]

$$\%\text{ความชื้น} = \left(\frac{A - C}{A - B}\right)100 \tag{3.3}$$

เมื่อ A คือ น้ำหนักภาชนะและสารตัวอย่างก่อนอบแห้ง

B คือ น้ำหนักภาชนะ

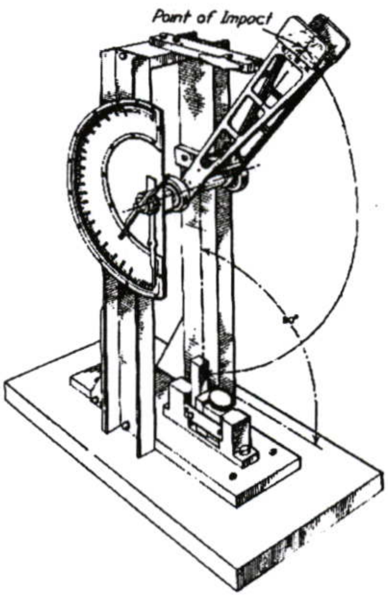
C คือ น้ำหนักภาชนะและสารตัวอย่างหลังอบแห้ง

3.9.3 การหาอุณหภูมิการสลายตัว [35]

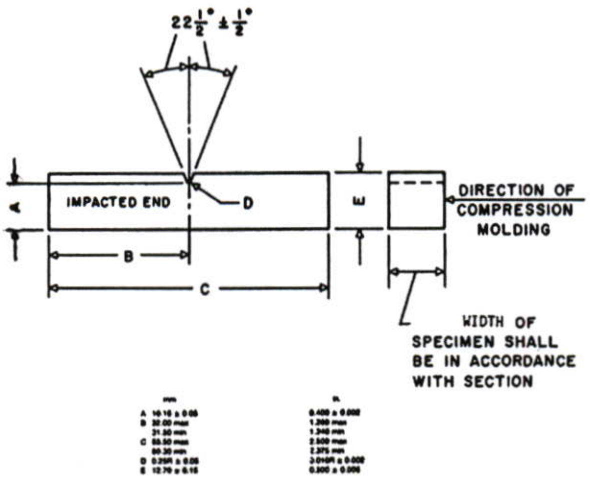
การหาอุณหภูมิการสลายตัวด้วยเครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (TGA) ใช้สารตัวอย่างประมาณ 5-10 มิลลิกรัม อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที อุณหภูมิเริ่มต้นคือ อุณหภูมิห้อง สภาวะที่ใช้คือ ก๊าซไนโตรเจน โดยเครื่องจะแสดงผลการเปลี่ยนแปลงมวลของสารตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อนด้วยอัตราคงที่

3.9.4 การทดสอบความต้านแรงกระแทก [36]

การทดสอบความต้านแรงกระแทก (Impact strength) เป็นไปดังมาตรฐาน ASTM D 256 โดยในการทดสอบใช้มาตรฐานแบบไอซอด (Izod type) ชิ้นงาน 10 ชิ้นต่อหนึ่งตัวอย่าง รูปที่ 3.1 แสดงเครื่องมือ Izod type ที่ใช้ในการทดสอบ และรูปที่ 3.2 แสดงชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3.1 เครื่องมือทดสอบความต้านแรงกระแทกแบบไอซอด [36]



รูปที่ 3.2 ชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบความต้านแรงกระแทกแบบไอซอด [36]

โดย	A	แสดงความยาว 10.16 ± 0.05 มิลลิเมตร
	B	แสดงความยาว 31.5 ถึง 32 มิลลิเมตร
	C	แสดงความยาว 60.30 ถึง 63.5 มิลลิเมตร
	D	แสดงมุมรูปตัววี เท่ากับ 22.5° ± 0.5°

ค่าความต้านแรงกระแทกสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{ความต้านแรงกระแทก (IS)} = W/A \qquad (3.4)$$

เมื่อ	IS	คือ ค่าความต้านแรงกระแทก (หน่วยเป็นกิโลจูลต่อตารางเมตร; kJ/m^2)
	W	คือค่าพลังงานกระแทก (หน่วยเป็นกิโลจูล; kJ)
	A	คือพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (หน่วยเป็นตารางเมตร; m^2)

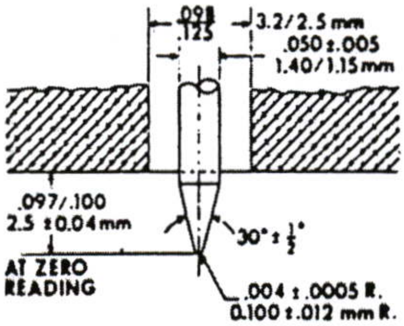
3.9.5 การทดสอบความแข็ง [37]

การทดสอบความแข็ง (Hardness) เป็นไปดังมาตรฐาน ASTM D 2240 ในการทดสอบเป็นการวิเคราะห์ความแข็งหรือความต้านทานต่อการเสียรูปของวัสดุ ซึ่งการทดสอบจะแตกต่างไปตามชนิดของพลาสติก โดยที่นิยมเป็นการทดสอบ 2 แบบ คือ การทดสอบความแข็งแบบร็อคเวล (Rockwell Hardness) และแบบดูโรมิเตอร์ (Durometer Hardness) แต่ละแบบจะใช้ทดสอบพลาสติกแตกต่างกันดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ค่าความแข็งของพลาสติกโดยทั่วๆ ไป [35]

ชนิดพลาสติก	Hardness		
	Rockwell		Durometer
	M	R	Shore D
ABS		75-115	
Acetal	94	120	
Acrylic	85-105		
Nylon		108-120	
Polycarbonate	72	118	
HDPE			60-70
LDPE			40-50
Polypropylene			75-85
Polystyrene	68-70		
PVC(rigid)		115	

โดยในการทดสอบนี้ใช้การทดสอบแบบดูโรมิเตอร์ ซึ่งใช้หัวกดแบบ D ลักษณะของหัวกดดังรูปที่ 3.3 ลักษณะพื้นผิวของวัสดุที่นำมาทดสอบต้องมีความเรียบ มีความหนาไม่ต่ำกว่า 6 มิลลิเมตร ใช้เวลากด 15 วินาทีจึงอ่านค่าได้ โดยทำการทดสอบ 5 ครั้งต่อหนึ่งตัวอย่าง ที่อุณหภูมิ 23± 2 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.3 ลักษณะหัวกดแบบ D [37]

3.9.6 การทดสอบความต้านแรงดัดโค้งและมอดุลัสยืดหยุ่น [38]

การทดสอบหาค่าความต้านแรงดัดโค้ง (Flexural strength) และมอดุลัสยืดหยุ่น (Modulus of elastic) เป็นไปดังมาตรฐาน ASTM D790 โดยการทดสอบแต่ละครั้งใช้ชิ้นงานตัวอย่าง 10 ชิ้น รูปที่ 3.4 เป็นภาพการทดสอบความแข็งแรงโค้งงอ สภาวะที่ใช้ในการทดสอบเป็นดังนี้

โหลดเซลล์ (Load)	5	กิโลนิวตัน (kN)
ความเร็วในการกด (Compression speed)	1.42	มิลลิเมตร/นาที
ระยะห่างของขารองรับชิ้นงาน (span length)	53	มิลลิเมตร
Grammage	1.0	กรัม/ตารางเมตร
ระดับเซลล์ (Cell class)	0.5	

สำหรับการคำนวณหาระยะห่างของขารองรับชิ้นงาน (Span length) และความเร็วในการกด (Compression speed) มีดังนี้

$$\text{ระยะห่างของขารองรับชิ้นงาน ; } L = 16\,d \quad (3.5)$$

$$\text{ความเร็วในการกด ; } R = \frac{ZL^2}{6d} \quad (3.6)$$

เมื่อ L คือ ระยะห่างของขารองรับชิ้นงาน (หน่วยเป็นมิลลิเมตร; mm)

d คือ ความหนาของชิ้นงาน (หน่วยเป็นมิลลิเมตร; mm)

Z คือ อัตราการเกิดความเครียดในส่วนของเส้นใย 0.01 (หน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อมิลลิเมตร ; mm/mm)

โดยสูตรที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความต้านแรงดัดโค้งและมอดุลัสยืดหยุ่นมีดังนี้

$$\text{ค่าความต้านแรงดัดโค้ง ; } MOR = \frac{1.5FL}{bh^2} \quad (3.7)$$

$$\text{มอดุลัสยืดหยุ่น ; } MOE = \frac{L^3}{4bh^3} \times \frac{\Delta F}{\Delta d} \quad (3.8)$$

เมื่อ F คือ แรงกดสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานโค้งงอ (หน่วยเป็นนิวตัน; N)

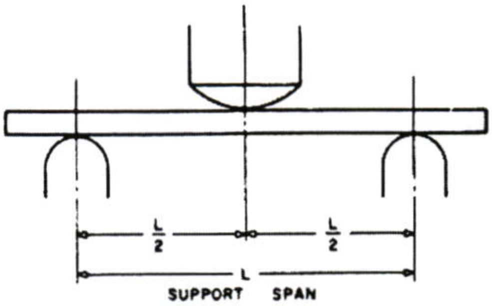
L คือ ระยะห่างของขารองรับชิ้นงาน (หน่วยเป็นมิลลิเมตร; mm)

b คือ ความกว้างของตัวอย่าง (หน่วยเป็นมิลลิเมตร; mm)

h คือ ความหนาของตัวอย่าง (หน่วยเป็นมิลลิเมตร; mm)

ΔF คือ ผลต่างของแรงกด ณ จุดเริ่มต้นถึงแรงกดที่ 60 N ในช่วงความชันเป็นเส้นตรง (หน่วยเป็นนิวตัน; N)

Δd คือ ระยะโค้งงอในช่วงแรงกด 60 N(หน่วยเป็นมิลลิเมตร; mm)

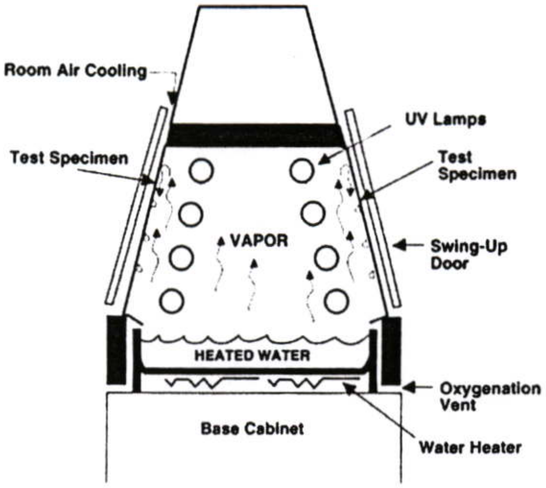


รูปที่ 3.4 การทดสอบความต้านแรงดัดโค้ง [38]

3.9.7 การทดสอบความทนทานต่อสภาพแวดล้อมของวัสดุเชิงประกอบ [39]

การทดสอบในสภาวะที่มีการเร่งสภาพแวดล้อม (Accelerated weathering) เพื่อทดสอบเสถียรภาพของวัสดุเนื่องจากแสงยูวีเลียนแบบแสงธรรมชาติ โดยใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ UVB-313 เป็นไปดังมาตรฐาน ASTM G 154-00 a $^{\varepsilon_1}$ เครื่องมือและอุปกรณ์ประกอบด้วย หลอด UVB-313 ตัวจับชิ้นงานและอ่างน้ำร้อน ดังรูปที่ 3.5 และ 3.6 สำหรับขนาดของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบเป็นไปตามแต่ละมาตรฐานการทดสอบสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ เช่น ความแข็ง Shore D ความต้านแรงกระแทก หรือความต้านแรงดัดโค้ง เป็นต้น สภาวะที่ใช้ทดสอบวัสดุเชิงประกอบ คือ ไซเคิลที่ 3 (Cycle 3) ซึ่งประกอบด้วยการให้รังสี 8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และมีการให้ละอองน้ำเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดยทำการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุเชิงประกอบก่อนการทดสอบและหลังการให้รังสีเป็นเวลา 100 200 และ 300 ชั่วโมง ตามลำดับ

รูปที่ 3.5 เครื่องกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเลต [39]

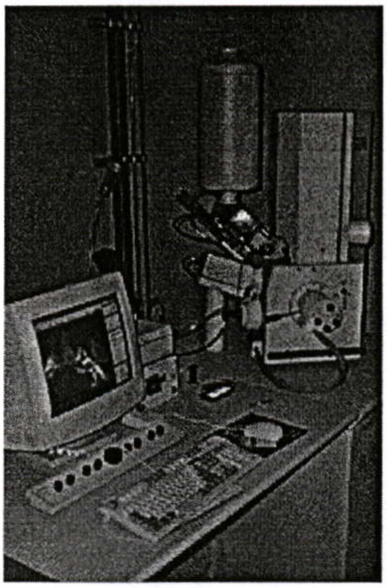


รูปที่ 3.6 เครื่องมือและการทดสอบความทนทานต่อสภาพแวดล้อม [39]

3.9.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [40]

โครงสร้างของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนสามารถศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคบนพื้นผิววัตถุด้วยเทคนิคระบบเลนส์แบบอิเล็กตรอนสแกน โดยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนจะต้องทำงานในคอลัมน์สุญญากาศ โดยถูกบังคับด้วยสนามไฟฟ้าสูงเร่งให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูง การปรับเปลี่ยนกำลังขยายและความคมชัดของระบบเลนส์อิเล็กตรอนเป็นการปรับปริมาณกระแสไฟฟ้าในขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก รวมทั้งระบบการมองเห็นภาพต้องอาศัยตัวกลางในการเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กตรอนที่เกิดจากอันตรกิริยาในโครงสร้างระดับจุลภาคของชิ้นตัวอย่างให้ปรากฏเป็นภาพที่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ใช้นำมาศึกษาลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์ที่แตกหักที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic fracture) โดยมีลักษณะดังรูปที่ 3.7 การเตรียมตัวอย่างทำได้โดยนำชิ้นงานตัวอย่างมาแช่ในไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) และทำการหักทันที หลังจากนั้นตัดชิ้นงานขนาดความกว้าง 3 มิลลิเมตร ความยาว 5 มิลลิเมตร และความสูง 8 มิลลิเมตร และนำมาเคลือบด้วยทองเพื่อให้มีการนำไฟฟ้า และนำเข้าเครื่อง SEM ต่อไป โดยทำการศึกษาการกระจายตัวของเส้นใยและการยึดติดระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์

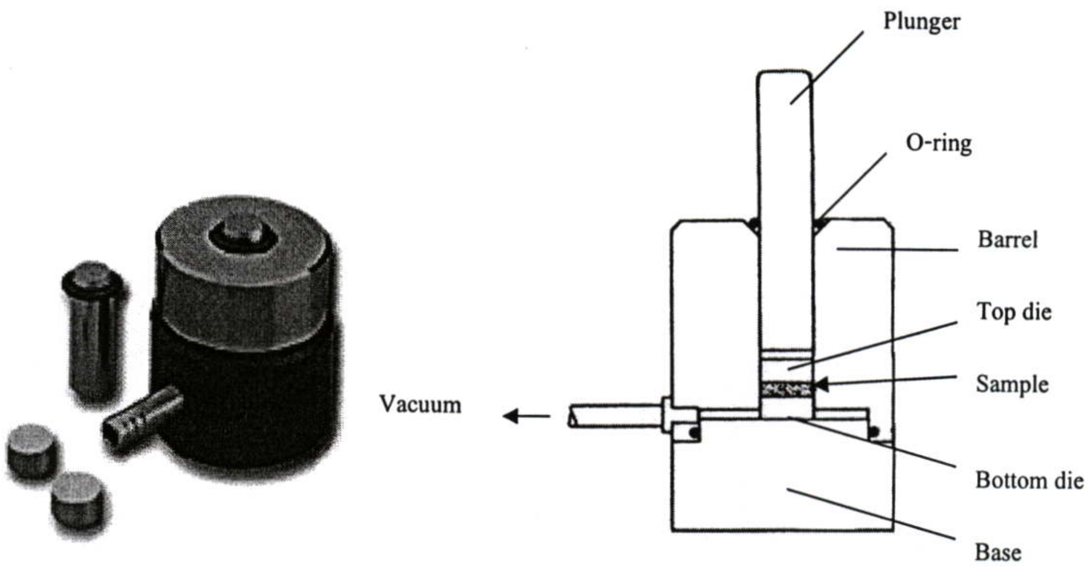


รูปที่ 3.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [40]

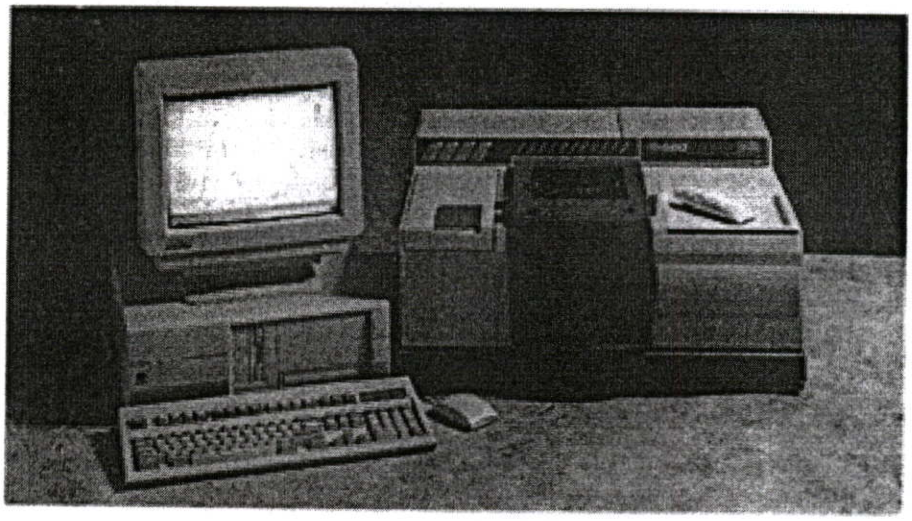
3.9.9 อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี [41]

อินฟราเรดเป็นเทคนิคอย่างหนึ่งที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ ตรวจสอบ พิสูจน์และศึกษาเกี่ยวกับโมเลกุลของสาร ซึ่งอาจอยู่ในสถานะของแข็ง หรือของเหลว หรือก๊าซก็ได้ ข้อมูลที่ได้คือ เป็นข้อมูลที่เกี่ยวกับการเกิดการสั่น (Vibration) การหมุน (Rotation) พันธะของโมเลกุลนั้นเกิดจากการยืด (Stretching) หรือการงอ (Bending) ที่แตกต่างกันทำให้เกิดอินฟราเรดสเปกตรัมแตกต่างกันไปด้วย

การทดสอบทำได้โดยนำสารตัวอย่างประมาณ 2 มิลลิกรัม ผสมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) ในโกร่งอะเกต หรือ Ball mill แล้วบดให้ละเอียดจนเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งการทำ KBr-Pellet ควรให้มีสารตัวอย่างเข้มข้นประมาณ 0.1-2 เปอร์เซ็นต์ แต่เปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับปริมาณสารตัวอย่างนั้นดูดกลืนแสงอินฟาเรดได้ดีเพียงใด เมื่อบดได้ดีแล้วนำไปใส่ในเครื่องอัดขึ้นรูปเป็นแผ่นกลมบางซึ่งเรียกว่า ดาย (Die) ดังรูปที่ 3.8 จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ในช่วงเลขคลื่น 4000-650 cm^{-1} ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.8 เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมสารตัวอย่าง [35]



รูปที่ 3.9 เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ [35]

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการศึกษาสมบัติเบื้องต้นของพอลิเอทิลีนที่ใช้แล้วและผงหนัง

4.1.1 สมบัติของพอลิเอทิลีนที่ใช้แล้ว

ในการนำพลาสติกที่ผ่านการใช้งานมาแล้วกลับมาใช้ใหม่ โดยอาศัยหลักการผสมกับวัสดุเสริมแรงอื่นๆ เพื่อนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ งานวิจัยนี้ได้นำพอลิเอทิลีนที่ใช้แล้วมาแปรใช้ใหม่ ซึ่งมีสมบัติดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สมบัติของพอลิเอทิลีนที่ใช้แล้ว

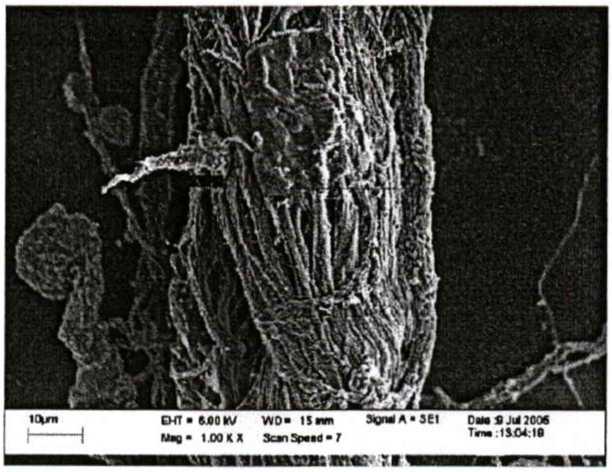
สมบัติ	ค่าที่วิเคราะห์ได้
ความหนาแน่น (g/cm^3)	0.946
ความต้านการดึงยืด (N/mm^2)	21.78
ความต้านแรงดัดโค้ง (N/mm^2)	15.33
มอดุลัสยืดหยุ่น (N/mm^2)	1850.69
ความแข็ง (Shore D)	51.06
ความต้านแรงกระแทกแบบไอซอด (kJ/m^2)	4.243

4.1.2 สมบัติของผงหนัง

จากการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของผงหนัง เช่น อุณหภูมิการสลายตัววิเคราะห์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (TGA) เส้นผ่านศูนย์กลางของผงหนังวิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รวมทั้งความชื้นได้ผลดังตารางที่ 4.2 และเมื่อตรวจสอบสัณฐานวิทยาของเส้นใยด้วย SEM พบว่ากระจุกเส้นใยมีลักษณะเป็นมัดของเส้นใยเล็กๆ ดังรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.2 สมบัติเบื้องต้นของผงหนัง

สมบัติ	ค่าที่วิเคราะห์ได้
ความชื้น (%)	16
อุณหภูมิการสลายตัว (°C)	260
เส้นผ่านศูนย์กลาง (μm)	50



รูปที่ 4.1 ลักษณะของกระจุกเส้นใยกำลังขยาย 1000 เท่า

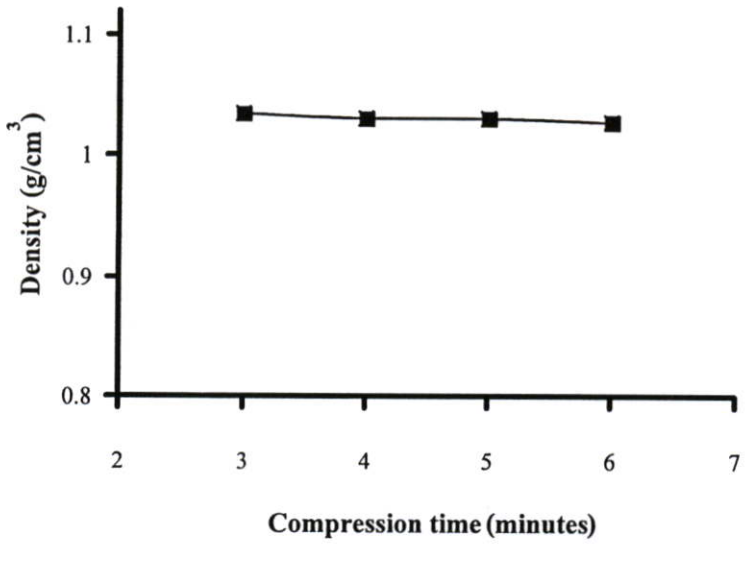
เมื่อบดย่อยผงหนังหยาบให้มีขนาดเล็กลงจะได้ผงหนังที่มีขนาดแตกต่างกัน จากการวิเคราะห์การกระจายของขนาดผงหนังด้วยเครื่องคัดแยกขนาด พบว่าผงหนังขนาด 5-7 mesh (4000-2360 µm) และขนาด 20-29 mesh (849-600 µm) มีปริมาณมากที่สุดและรองลงมาตามลำดับ ดังตารางที่ 4.3 ดังนั้นในงานวิจัยจึงนำสองขนาดดังกล่าวมาใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 4.3 การกระจายขนาดของผงหนัง

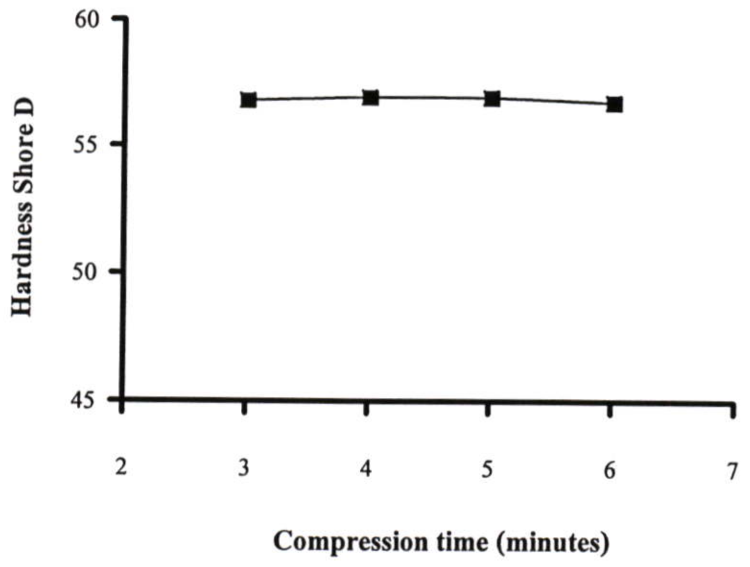
ขนาดตะแกรงคัดขนาด		ปริมาณที่วิเคราะห์ได้ (%)
เมช	ไมโครเมตร (µm)	
มากกว่า หรือเท่ากับ 140	น้อยกว่า หรือเท่ากับ 105	1.85
139-100	105-149	2.12
99-60	150-249	3.61
59-50	250-299	4.79
49-40	300-424	9.55
39-30	425-599	6.46
29-20	600-849	23.54
19-8	850-2359	10.29
7-5	2360-4000	37.27
น้อยกว่า หรือเท่ากับ 4	มากกว่าหรือเท่ากับ 4750	0.52

4.2 ผลการศึกษากระบวนการผลิตวัสดุเชิงประกอบ

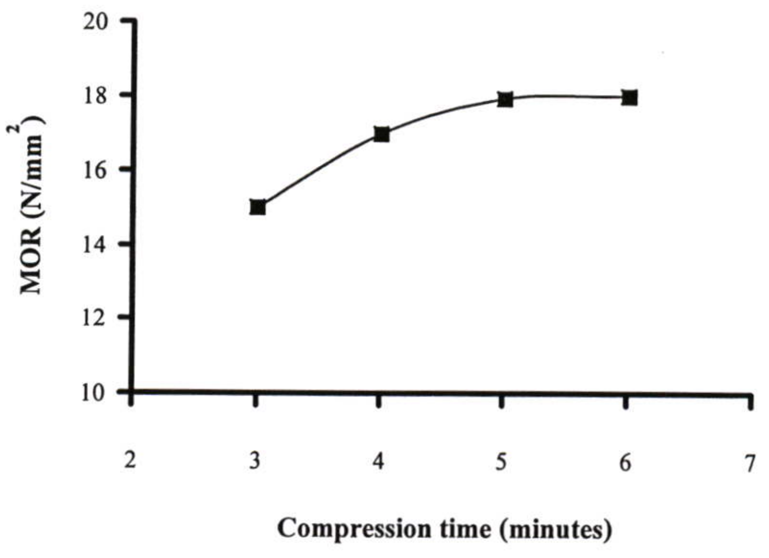
จากผลการศึกษาขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์อัด ด้วยอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับหลอมเหลวพอลิเอทิลีนและยางรีเคลม และไม่ทำให้โครงสร้างโมเลกุลของผงหนังเกิดการสลายตัว จากการทดลองใช้เวลาในการขึ้นรูป 3-6 นาที แล้วนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ เช่น ความหนาแน่น (Density) ความแข็ง (Hardness) ความต้านแรงดัดโค้ง (Flexural strength) มอดุลัสยืดหยุ่น (Modulus of elastic) และความต้านแรงกระแทก (Impact strength) พบว่าเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปที่ให้ผลดีที่สุดคือ 5-6 นาที ดังรูปที่ 4.2-4.6 และตารางที่ ก. 1 โดยพบว่าที่เวลาต่างกัน ความหนาแน่นและความแข็งมีค่าใกล้เคียงกัน คือ 1.030 g/cm^3 และ 56.72-56.93 (Shore D) ตามลำดับ แต่ในส่วนของความต้านแรงดัดโค้ง มอดุลัสยืดหยุ่น และความต้านแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาที่ใช้ขึ้นรูปเพิ่มขึ้นจนถึงระดับหนึ่งคือ 5 นาที จากการสังเกตลักษณะทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบด้วยตาเปล่า พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่ใช้เวลาขึ้นรูปนาน 3 และ 4 นาที มีบางส่วนที่ไม่หลอมและเข้ากันได้ไม่ดีพอ จึงเกิดเป็นจุดด้อยของชิ้นงาน (Weak points) ซึ่งเป็นเหตุผลที่ทำให้วัสดุรับและส่งถ่ายแรงไม่ดีเท่าที่ควรส่งผลให้สมบัติเชิงกลที่ได้มีค่าน้อย สำหรับวัสดุเชิงประกอบที่ขึ้นรูปนาน 5 และ 6 นาที มีการหลอมเป็นเนื้อเดียวกัน ดังนั้นระยะเวลาที่เหมาะสมในการขึ้นรูปคือ 5 นาที



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับเวลาในการขึ้นรูป

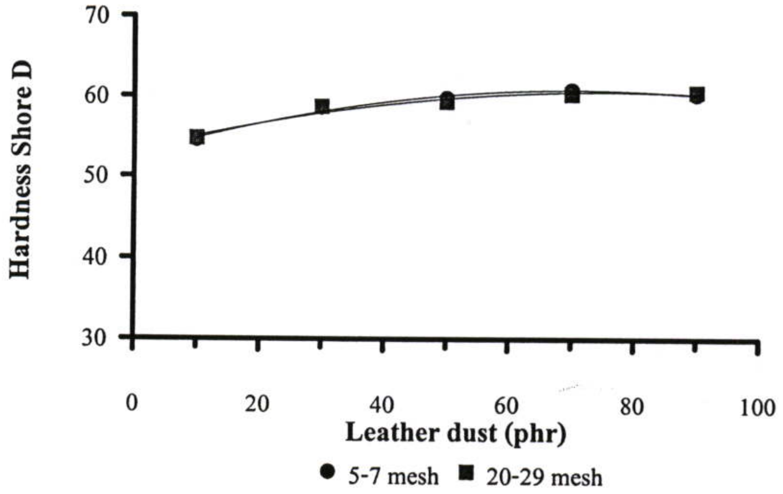


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับเวลาในการขึ้นรูป

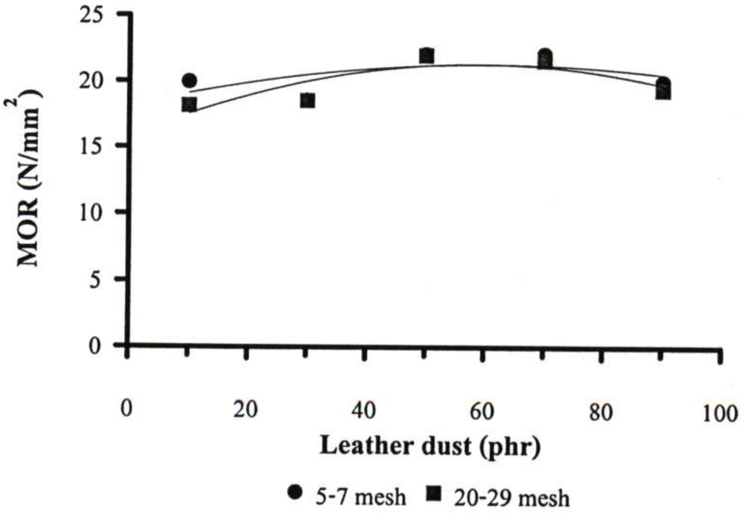


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านแรงดัดโค้งกับเวลาในการขึ้นรูป

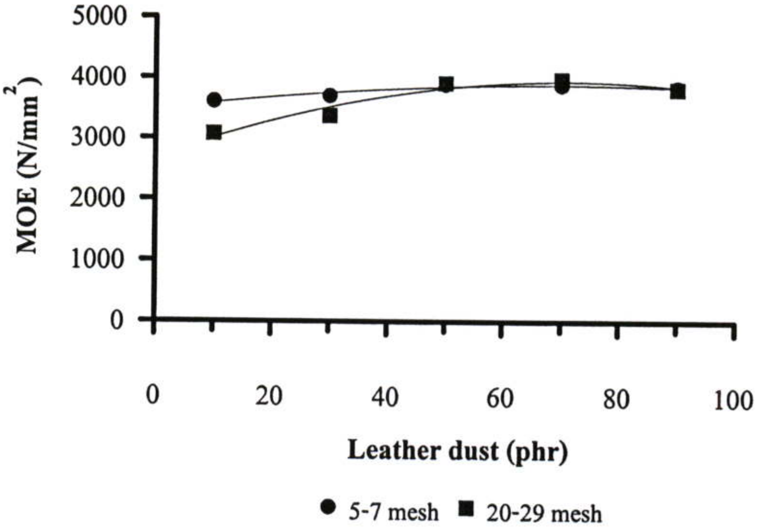
แต่ในส่วนของความต้านแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้ผงหนังขนาด 5-7 mesh มีค่าอยู่ในช่วง 4.24-6.51 kJ/m^2 ให้ผลดีกว่าการใช้ขนาดผงหนัง 20-29 mesh ซึ่งมีค่า 3.79-6.37 kJ/m^2 โดยจากการคำนวณหาอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect ratio) ของผงหนังได้ผลดังตารางที่ 4.4 โดยผงหนังขนาด 5-7 mesh มี Aspect ratio มากกว่าผงหนังขนาด 20-29 mesh อาจสรุปได้ว่า Aspect ratio สูง ทำให้วัสดุมีความสามารถในการรับและส่งผ่านแรงได้ดี เนื่องจากประสิทธิภาพในการรับแรงจะเกิดขึ้นตามความยาวของเส้นใย ซึ่งมีพื้นที่ในการดูดซับพลังงานมากกว่า [42] ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้ผงหนังขนาด 5-7 mesh สามารถรับแรงกระแทกได้ดีกว่าผงหนังขนาด 20-29 mesh ซึ่งจะได้ใช้ผงหนังขนาด 5-7 mesh ในการศึกษาปัจจัยอื่นๆ ต่อไป



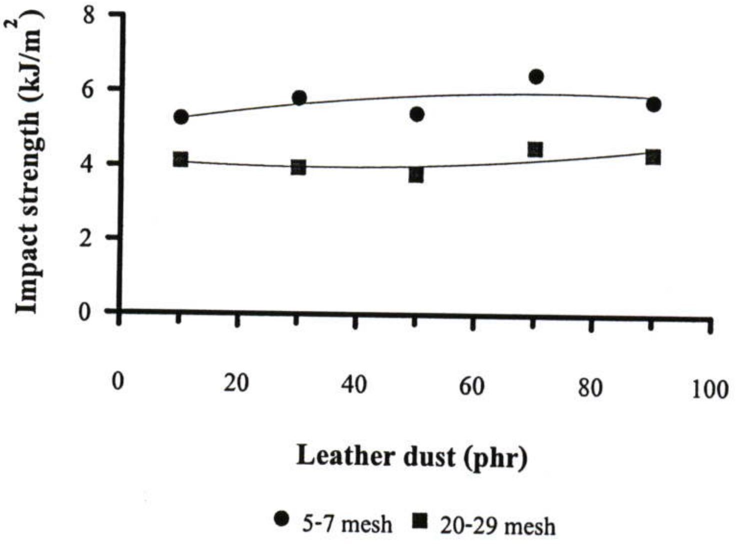
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับปริมาณผงหนัง ที่ปริมาณยางรีเคลม 15 phr



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านแรงดัดโค้งกับปริมาณผงหนัง ที่ปริมาณยางรีเคลม 15 phr



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสยืดหยุ่นกับปริมาณผงหนัง ที่ปริมาณยางรีเคลม 15 phr



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านแรงกระแทกกับปริมาณผงหนัง ที่ปริมาณยางรีเคลม 15 phr

ตารางที่ 4.4 อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของผงหนังที่ใช้ในการวิจัย

ขนาดตะแกรงคัดขนาด		อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง
เมช	ไมโครเมตร (μm)	(Aspect ratio, L/d)
5-7	4000-2360	49.04
20-29	849-600	17.67

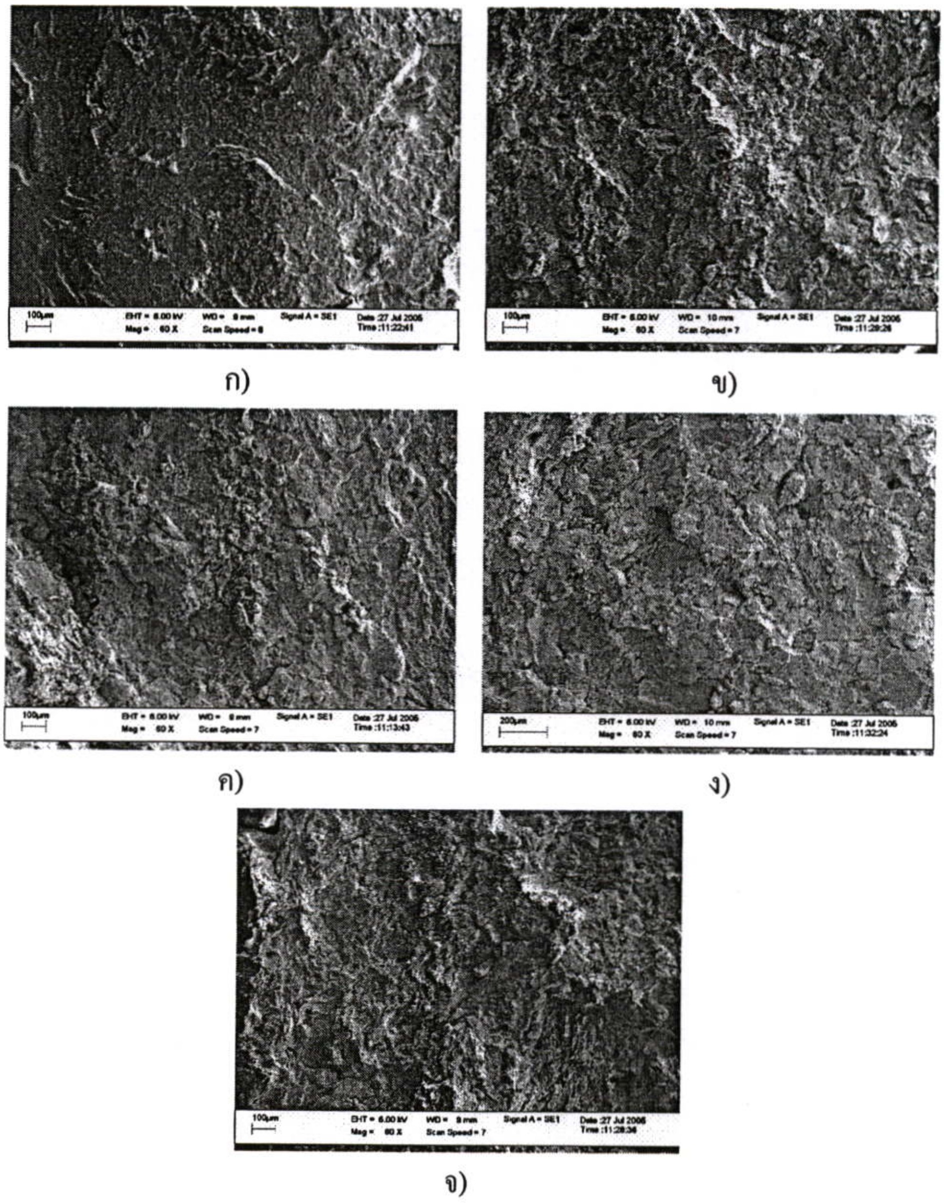
ส่วนการศึกษาผลกระทบของปริมาณผงหนังที่มีต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบต่างๆ จากการทดลองได้ผลดังรูปที่ 4.7-4.10 และตารางที่ ก. 2

รูปที่ 4.7 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับปริมาณผงหนัง พบว่าการเพิ่มปริมาณผงหนัง ทำให้ความแข็งของวัสดุเชิงประกอบโดยรวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากผงหนังถือว่ามีความแข็งแรงและมีความเหนียว [17] ในขณะที่พอลิเมอร์เมทริกซ์ในที่นี้คือ พอลิเอทิลีน สามารถรับแรงกดได้น้อย เพราะสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์นั้นมีความอ่อนนิ่ม ดังนั้นเมื่อเติมผงหนังลงในพอลิเมอร์จึงช่วยทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความแข็งเพิ่มสูงกว่าพอลิเมอร์ที่ไม่มีการเติมสารเสริมแรง

รูปที่ 4.8-4.10 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความต้านแรงดัดโค้ง มอดุลัสยืดหยุ่น และความต้านแรงกระแทกกับปริมาณผงหนัง พบว่าที่ปริมาณผงหนัง 10-70 phr มีค่า 15.03-23.66 N/mm^2 2815.65-4965.34 N/mm^2 และ 4.34-6.51 kJ/m^2 ตามลำดับ ซึ่งสมบัติเหล่านี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตามปริมาณผงหนัง เนื่องจากผงหนังใช้เป็นสารตัวเติมและขณะเดียวกันทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรงให้แก่วัสดุ ซึ่งโดยโครงสร้างของหนังเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรงและมีความยืดหยุ่น รวมทั้งสามารถรับแรงได้ในระดับหนึ่ง [17] เมื่อเข้าไปกระจายตัวอยู่ในพอลิเมอร์สามารถเกิดการเกี่ยวพันกันกับสายโซ่ของพอลิเมอร์ได้ (Chain entanglement) ซึ่งเป็นการเกี่ยวพันเชิงกล ดังนั้นจึงส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีความสามารถในการรับแรงได้เพิ่มมากขึ้น

อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณผงหนังมากกว่า 70 phr สมบัติโดยรวมของวัสดุเชิงประกอบมีค่าลดลงเล็กน้อย แต่ยังมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์ที่ไม่มีการเติมสารเสริมแรง เนื่องจากการเติมผงหนังในปริมาณมากๆ นั้น อาจเกิดการกระจายตัวได้ไม่ดี โดยมีพื้นที่บางส่วนที่เกิดการเกาะเป็นกลุ่มๆ ซึ่งพื้นที่ที่ผงหนังเกิดการรวมกันนั้นจะเป็นส่วนที่ไม่มีพอลิเมอร์เมทริกซ์ในการยึดติดเพื่อส่งถ่ายและกระจายแรงไปสู่บริเวณอื่นๆ ภายในวัสดุเชิงประกอบ จึงเกิดเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงาน ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดการแตกหักของชิ้นงาน [42] ดังนั้นเมื่อให้แรงกระทำจึงไม่สามารถรับแรงได้ดีเท่าที่ควร สมบัติที่ได้จึงมีแนวโน้มที่ลดลง โดยในการศึกษาปัจจัยต่อไปจึงควบคุมปริมาณผงหนังอยู่ที่ 70 phr

สำหรับการศึกษาสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราด (SEM) จะเห็นลักษณะการกระจายตัวของผงหนังที่อัตราส่วนต่างๆ ดังรูปที่ 4.11 โดยจะเห็นได้ว่าที่ปริมาณผงหนัง 10-70 phr (รูปที่ 4.11 ก-ง) มีการกระจายตัวที่ดี แต่ในส่วนที่ปริมาณ 90 phr (รูปที่ 4.11 จ) ผงหนังจะกระจุกตัวรวมอยู่กันเป็นกลุ่มๆ



รูปที่ 4.11 ลักษณะการกระจายตัวของผงหนังปริมาณต่างๆ ที่ปริมาณยางรีเคลม 15 phr กำลังขยาย 60 เท่า ก) 10 phr ข) 30 phr ค) 50 phr ง) 70 phr จ) 90 phr

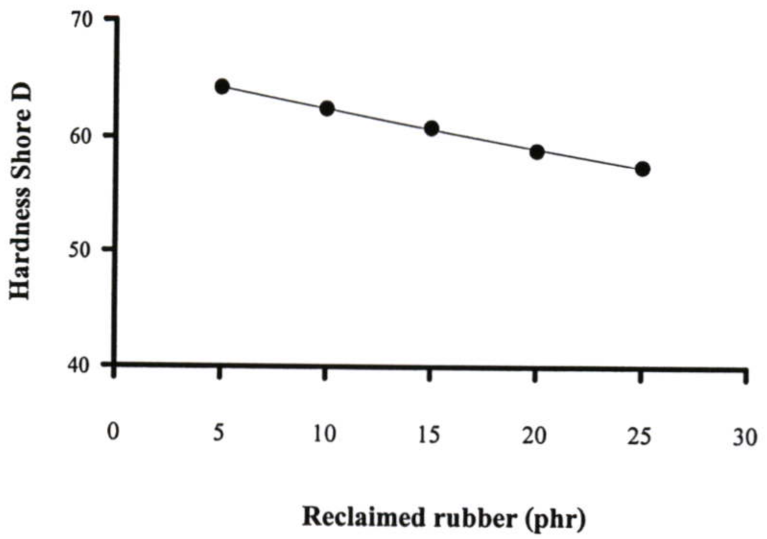
4.4 ผลการศึกษาปริมาณยางรีเคลมที่มีต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ

จากการศึกษาผลของปริมาณยางรีเคลม ที่ปริมาณผงหนัง 70 phr และใช้ผงหนังขนาด 5-7 mesh สมบัติเชิงกลต่างๆ ของวัสดุเชิงประกอบจากการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.12-4.15 และตารางที่ ก. 3

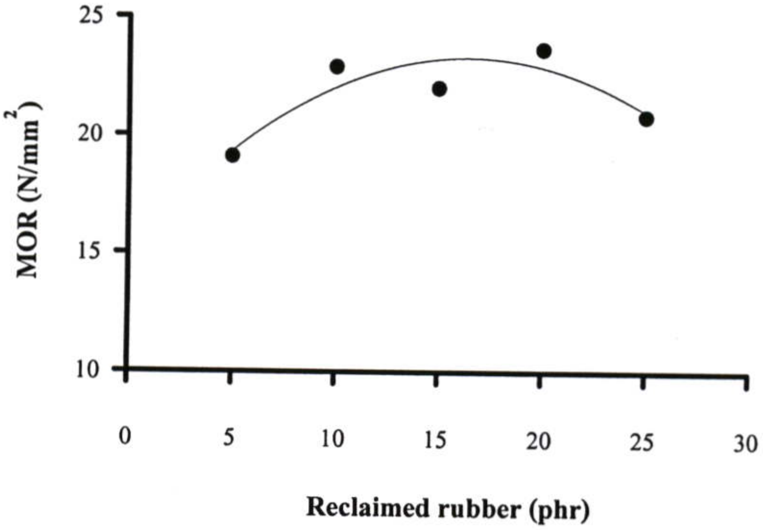
รูปที่ 4.12 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับปริมาณยางรีเคลม พบว่าความแข็งของวัสดุเชิงประกอบอยู่ในช่วง 53.37-62.47 (Shore D) โดยการเพิ่มปริมาณยางรีเคลมทำให้ความแข็งโดยรวมมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากในยางรีเคลมมีองค์ประกอบส่วนใหญ่ คือ ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ ซึ่งมีสมบัติเป็นอิลาสโตเมอร์ (Elastomer) มีความอ่อนนิ่ม ยืดหยุ่นและเหนียวติด (Tack) [43] ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ซึ่งมีความแข็งมากกว่า จึงเป็นเหตุผลให้ความแข็งของวัสดุเชิงประกอบมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณยางรีเคลม

รูปที่ 4.13-4.15 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความต้านแรงดัดโค้ง มอดุลัสยืดหยุ่น และความต้านแรงกระแทกกับปริมาณยางรีเคลม พบว่าความต้านแรงดัดโค้งและแรงกระแทกมีค่าอยู่ในช่วง 15.03-23.51 N/mm^2 และ 4.24-6.51 kJ/m^2 ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณยางรีเคลม ส่วนมอดุลัสยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยการเติมยางรีเคลมในปริมาณมากๆ เช่น 25 phr สมบัติที่ได้ไม่แตกต่างกับการเติม 20 phr มากแต่อย่างใด ซึ่งสมบัติเหล่านี้ดีกว่าพอลิเอทิลีนที่ไม่มีการเติมยางรีเคลม เนื่องจากยางรีเคลมเป็นยางที่ใช้แล้วซึ่งผ่านกระบวนการเชิงกลหรือทางความร้อน โดยพันธะคาร์บอน-คาร์บอนเกิดการแตกออก แต่ส่วนของพันธะซัลเฟอร์ส่วนใหญ่นั้นไม่เกิดการแตกตัว ทำให้โครงสร้างของยางยังเป็นโครงสร้างสามมิติซึ่งมีความแข็งแรง [20] ดังนั้นเมื่อยางรีเคลมเข้าไปแทรกตัวอยู่ในวัสดุเชิงประกอบจึงส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

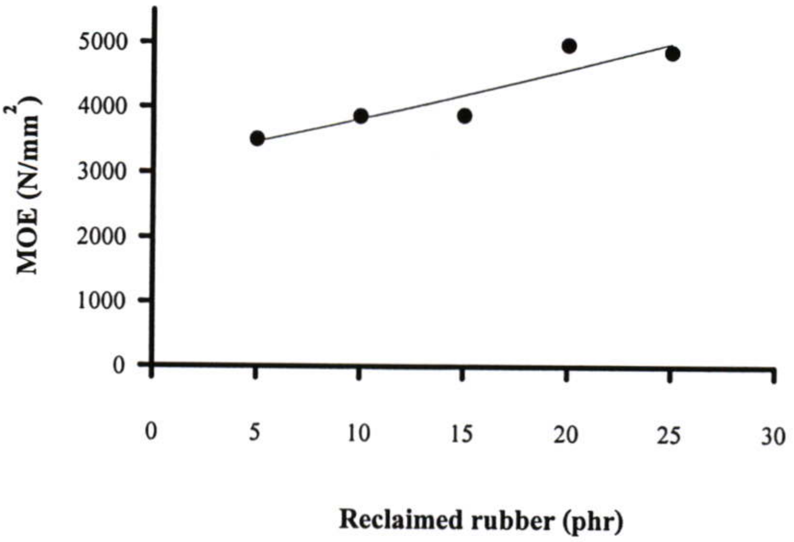
ขณะที่ยางรีเคลมส่วนใหญ่มียางธรรมชาติและยางสังเคราะห์เป็นองค์ประกอบหลัก มีความยืดหยุ่นและความเหนียว นอกจากยางรีเคลมจะทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมแล้วยังทำหน้าที่เป็นตัวยึดติดได้ดีในระดับหนึ่ง [20, 43] ทำให้เกิดการยึดติดกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ และช่วยให้ผงหนังยึดเกาะกับพอลิเมอร์ลดรอยต่อที่ไม่สมบูรณ์ (Imperfect joints) ระหว่างทั้งสองลงเป็นการยึดเกาะเชิงกล ประกอบกับเขม่าดำ (Carbon black) ที่ผสมอยู่ในยางรีเคลมสามารถรับและกระจายพลังงานที่ได้รับจากภายนอกได้เช่นกัน จึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้วัสดุรับแรงได้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้สมบัติต่างๆ ของวัสดุเชิงประกอบดีขึ้น



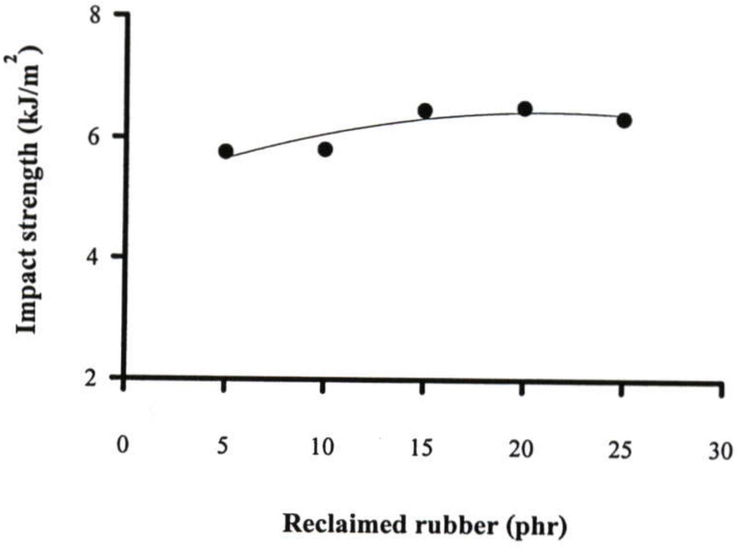
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับปริมาณยางรีเคลม ที่ปริมาณผงหนัง 70 phr



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านแรงดัดโค้งกับปริมาณยางรีเคลม ที่ปริมาณผงหนัง 70 phr



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสยืดหยุ่นกับปริมาณยางรีเคลม ที่ปริมาณผงหนัง 70 phr



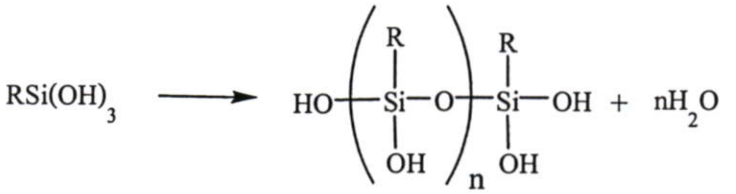
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านแรงกระแทกกับปริมาณยางรีเคลม ที่ปริมาณผงหนัง 70 phr

4.5 ผลการศึกษาประสิทธิภาพและปริมาณสารคู่ควบไซเลนที่ใช้ปรับปรุงพื้นผิวของผงหนัง

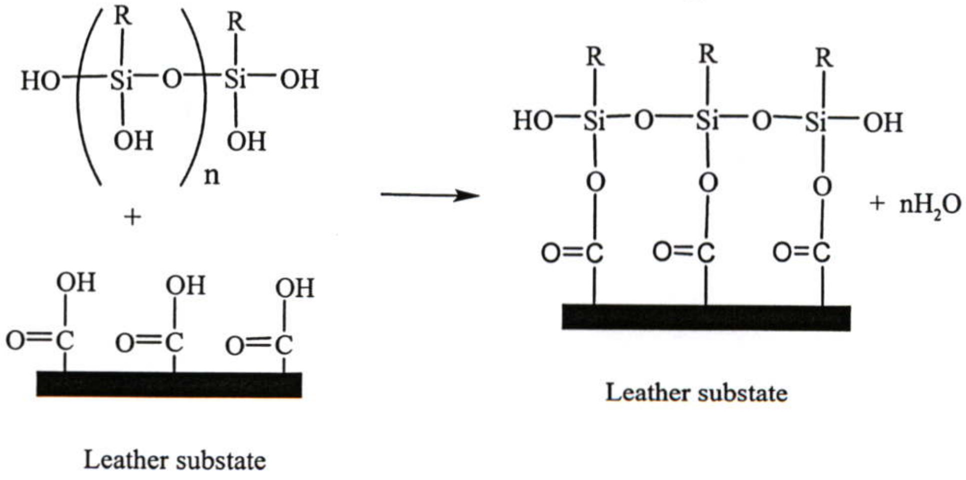
ในการศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวของผงหนังด้วยสารคู่ควบประเภทออร์กาโนไซเลน คือ 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (3-Aminopropyl-triethoxysilane, A) และเอ็น-อะมิโนเอทิล 3-อะมิโนโพรพิลเมทิลไดเมทอกซีไซเลน (N-aminoethyl-3-aminopropyl methyldimethoxysilane, B) ซึ่งเป็นอะมิโนไซเลน โดยทำการศึกษาที่อัตราส่วนของผงหนังขนาด 5-7 mesh และยางรีเคลม คือ 70 และ 20 phr ตามลำดับ ซึ่งในการปรับปรุงพื้นผิวของผงหนังปฏิกิริยาที่น่าจะเกิดขึ้นปรากฏดังรูปที่ 4.16

เริ่มจากหมู่อัลคอกซีของไซเลน (A และ B) เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ทำให้เกิดเป็นสารละลายไซเลนไตรออล (Silantriols) ที่มีความเสถียรน้อย ในขณะเดียวกันไซเลนไตรออล เกิดการรวมตัวกัน (Condensation) เป็นไซลอกซานอล (Siloxanols) ดังสมการที่ 1 [25] และเมื่อผงหนังผสมกับไซลอกซานอล หมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (-OH) บนพื้นผิวของหนังจึงรวมกับไซลานอลขจัดน้ำออกเกิดพันธะไซลอกเซน (Si-O-Si) ส่งผลให้เกิดเป็นโครงสร้างพอลิไซลอกเซน (Polysiloxane) ดังสมการที่ 2 ซึ่งโครงสร้างนี้จะทำให้พอลิเมอร์เมทริกซ์และผงหนังเกิดการยึดเกาะและเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น [44, 45]

$$RSi(OR')_3 + 3H_2O \longrightarrow RSi(OH)_3 + 3R'OH$$



1)



2)

R = $-(CH_2)_3NH_2$ (silane A) / $-CHNH_2(CH_2)_2NH_2$ (silane B)

R' = $-C_2H_5$ (silane A) / $-CH_3$ (silane B)

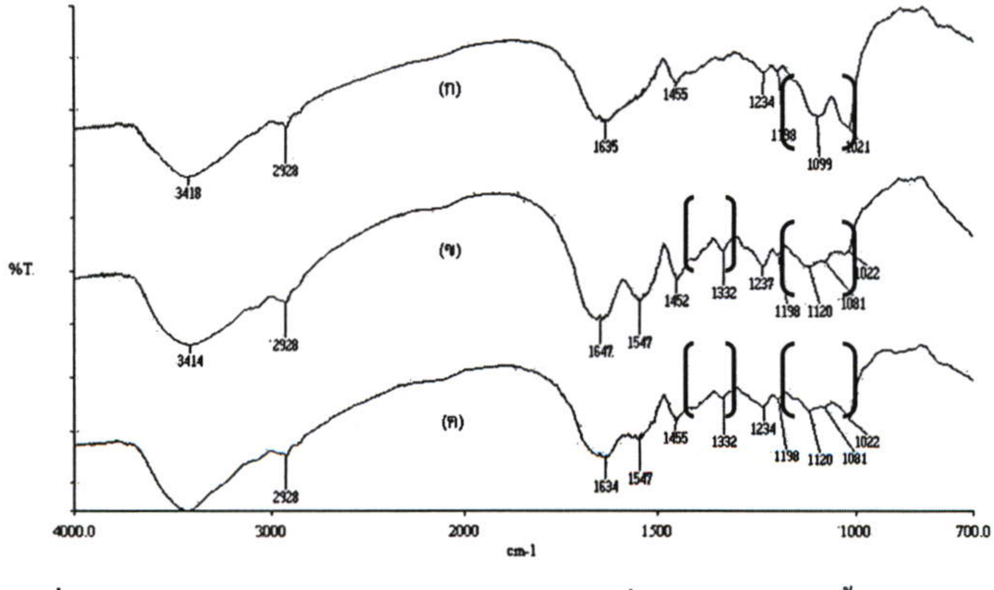
รูปที่ 4.16 กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไซเลนกับหมู่ฟังก์ชันของผงหนัง [44, 45]

เมื่อนำผงหนังที่มีและไม่มีการปรับปรุงด้วยสารคู่ควบไซเลน ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นด้วยอินฟราเรดสเปคโตรมิเตอร์ (รูปที่ 4.17) มีความแตกต่างดังสเปคตรัมของผงหนังที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบไซเลน (ก) กับสเปคตรัมของผงหนังที่ปรับปรุงแล้ว (ข และ ค) ซึ่งสามารถสรุปได้ตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ตำแหน่งสเปคตรัมของผงหนังที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน

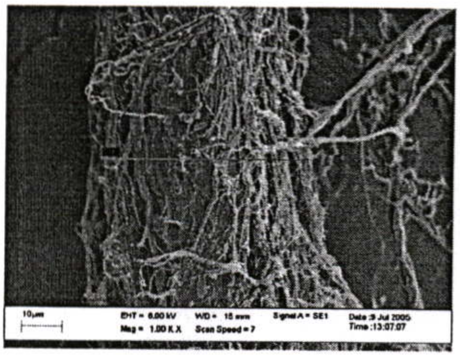
ตำแหน่งพีค (cm^{-1})	ลักษณะการสั่น
3200-3600	N-H Streching 2° amine/amide
2800-3100	C-H Streching of $-CH_3$
1600-1700	Carbonyl (C=O) of amide
1430-1470	C-H Bending of $-CH_2-$/ $-CH_3$
1200-1260	C-H Streching of amine
1100-1200	C-N Streching of amide
1022	C-H Bending in plane

สำหรับผงหนังที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 2 ชนิด พบตำแหน่งของพีคที่สำคัญซึ่งไม่ปรากฏในรูปที่ 4.17 ก คือที่ 1332 cm^{-1} เป็นลักษณะของ $Si-CH_3$ นอกจากนั้นยังเกิดการเปลี่ยนแปลงของพีคในช่วง 1022-1099 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งของพันธะไซลอกเซน (Si-O-Si) [44, 46] ดังนั้นผลของอินฟราเรดสเปคตรัมพบว่าสามารถเกิดการเชื่อมโยงกันของสารคู่ควบไซเลนกับหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวผงหนังได้ ดังเช่นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นข้างต้น

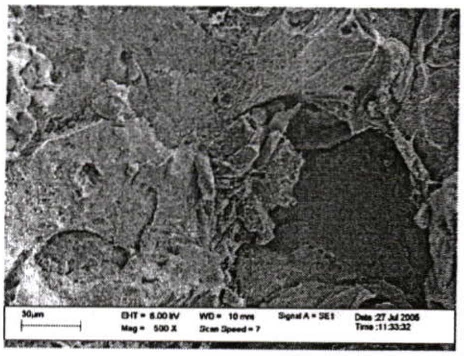


รูปที่ 4.17 อินฟราเรดสเปกตรัมของผงหนัง ก) ผงหนังที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิว ข) ผงหนังที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลน A ค) ผงหนังที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลน B

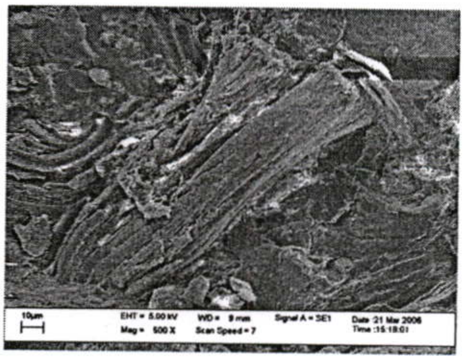
จากการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของผงหนังที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลน ปรากฏดังรูปที่ 4.18 และเมื่อเปรียบเทียบวัสดุเชิงประกอบที่ไม่มีการปรับปรุงกับที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลน จะเห็นความแตกต่าง ดังรูปที่ 4.19 กล่าวคือผงหนังที่ผ่านการปรับปรุงด้วยไซเลนแล้ว ก่อให้เกิดการแทรกตัวอยู่ในวัสดุเชิงประกอบจะช่วยลดช่องว่างของรอยต่อ (Interface) ระหว่างผงหนังกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ลงและผงหนังยังคงสภาพเป็นกระจุกเส้นใยที่เกิดจากการรวมตัวของเส้นใยเล็กๆ (รูปที่ 4.19 ก-ค)



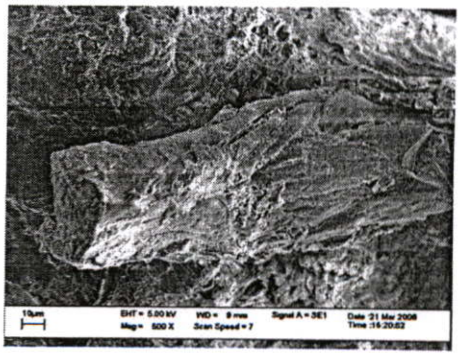
รูปที่ 4.18 ลักษณะผงหนังที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนกำลังขยาย 1000 เท่า



ก)



ข)



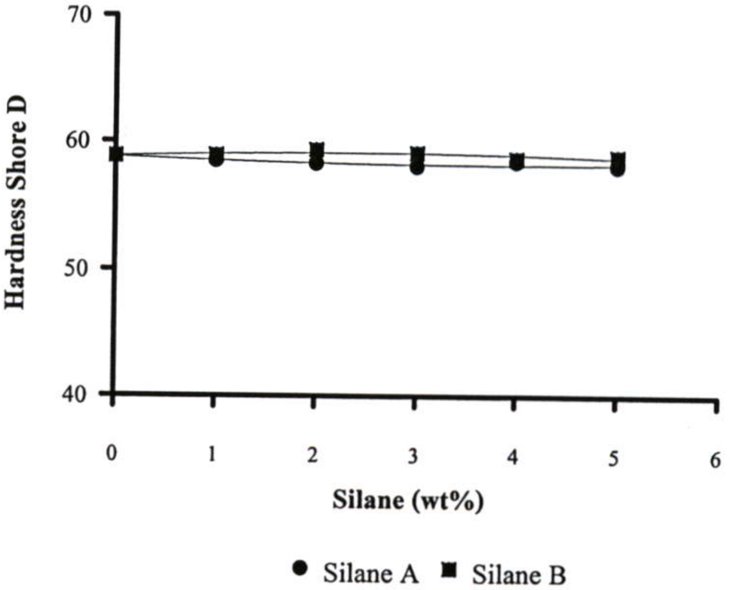
ค)

รูปที่ 4.19 ลักษณะการยึดเกาะของผงหนังกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ กำลังขยาย 500 เท่า
ก) ผงหนังที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิว ข) ผงหนังที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนA ค) ผงหนังที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน B

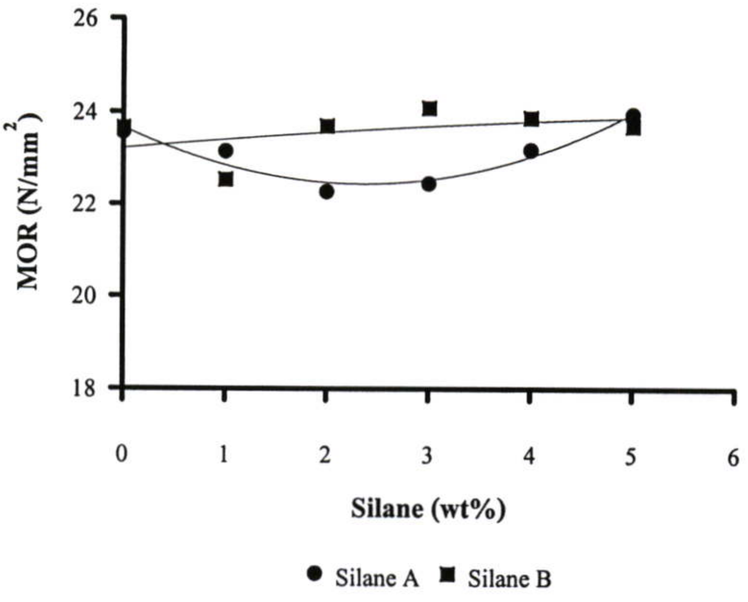
สำหรับสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบเมื่อเติมสารคู่ควบไซเลนได้ผลดังรูปที่ 4.20-4.23 และตารางที่ ก. 4

รูปที่ 4.20 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับปริมาณสารคู่ควบไซเลน 2 ชนิด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงพื้นผิวของผงหนังด้วยไซเลน A และ B ไม่ส่งผลต่อความแข็งมากนัก เนื่องจากเป็นการทดสอบความแข็งบริเวณพื้นผิวของวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งต่างจากการทดสอบเชิงกลอื่นๆ

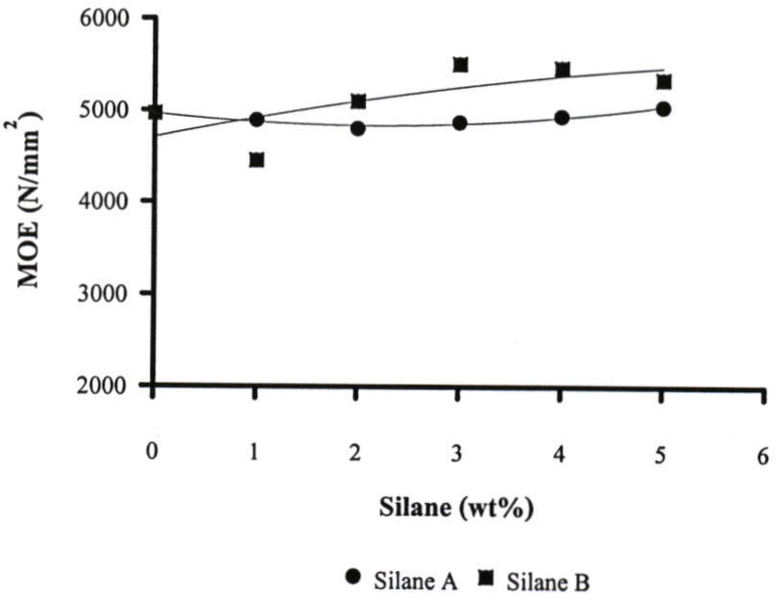
รูปที่ 4.21-4.23 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความต้านแรงดัดโค้ง มอดุลัสยืดหยุ่น และความต้านแรงกระแทกกับปริมาณสารคู่ควบไซเลน 2 ชนิด เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการทำงานของสารคู่ควบไซเลนแต่ละชนิด พบว่าการใช้ไซเลน 2 ชนิด เมื่อเพิ่มปริมาณไซเลนสมบัติของวัสดุเชิงประกอบมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยการใช้ไซเลน A 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก วัสดุเชิงประกอบมีความต้านแรงดัดโค้ง 23.94 N/mm^2 มอดุลัสยืดหยุ่น 5042.49 N/mm^2 และความต้านแรงกระแทก 6.55 kJ/m^2 ในขณะเดียวกันการใช้ไซเลนชนิด B ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีความต้านแรงดัดโค้ง 24.08 N/mm^2 มอดุลัสยืดหยุ่น 5510.61 N/mm^2 และความต้านแรงกระแทก 6.77 kJ/m^2 เมื่อใช้ในปริมาณ 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยการใช้ไซเลน B มากกว่า 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักนั้นให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน การที่สมบัติต่างๆ ของการใช้สารคู่ควบไซเลน A และ B สูงขึ้น เนื่องจากพันธะไซลอกเซน (Si-O-Si) ที่เกิดขึ้นหลังการปรับปรุงผงหนังด้วยไซเลนนั้นมีความแข็งแรง ประกอบกับทำให้เกิดการยึดเกาะของพอลิเมอร์เมทริกซ์กับผงหนังที่ดี ส่งผลให้สมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้ผงหนังซึ่งผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนมีสมบัติดีกว่าวัสดุเชิงประกอบที่ใช้ผงหนังซึ่งไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน



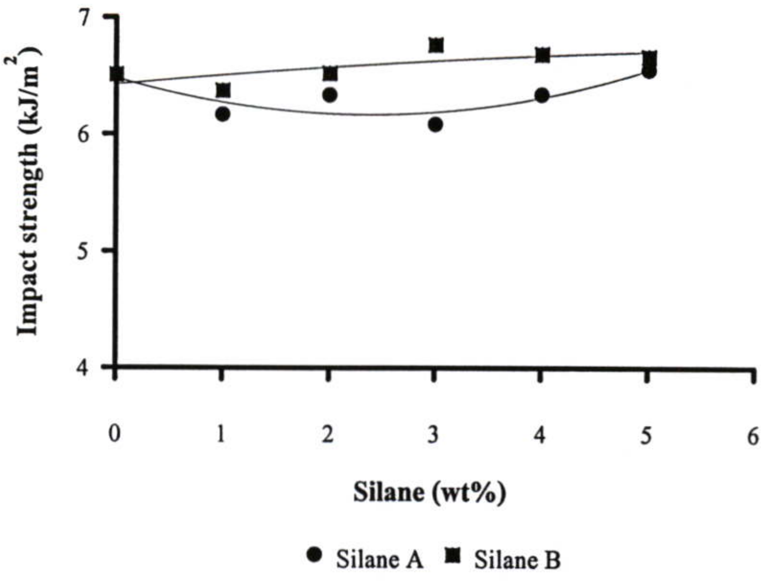
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับปริมาณสารคู่ควบไซเลน



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านแรงดัดโค้งกับปริมาณสารคู่ควบไซเลน



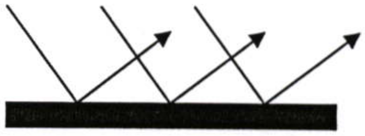
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสยืดหยุ่นกับปริมาณสารคู่ควบไซเลน



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านแรงกระแทกกับปริมาณสารคู่ควบไซเลน

4.6 ผลการศึกษาการใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ

ในการศึกษาการใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ เพื่อรักษาความเสถียรของวัสดุเชิงประกอบ โดยทำการศึกษาที่ปริมาณผงหนัง (ขนาด 5-7 mesh) และยางรีเคลม คือ 70 phr และ 20 phr ตามลำดับ ซึ่งไททาเนียมไดออกไซด์นอกจากจะใช้เป็นสารให้สีขาวแล้วนั้น (Whitening agents) ยังมีสมบัติเป็นตัวป้องกันแสงยูวี (Screening agents) โดยจะสะท้อนแสงยูวีกลับออกไป เพื่อไม่ให้เข้าไปทำลายโครงสร้างภายในวัสดุ มีลักษณะดังรูปที่ 4.24 [47]

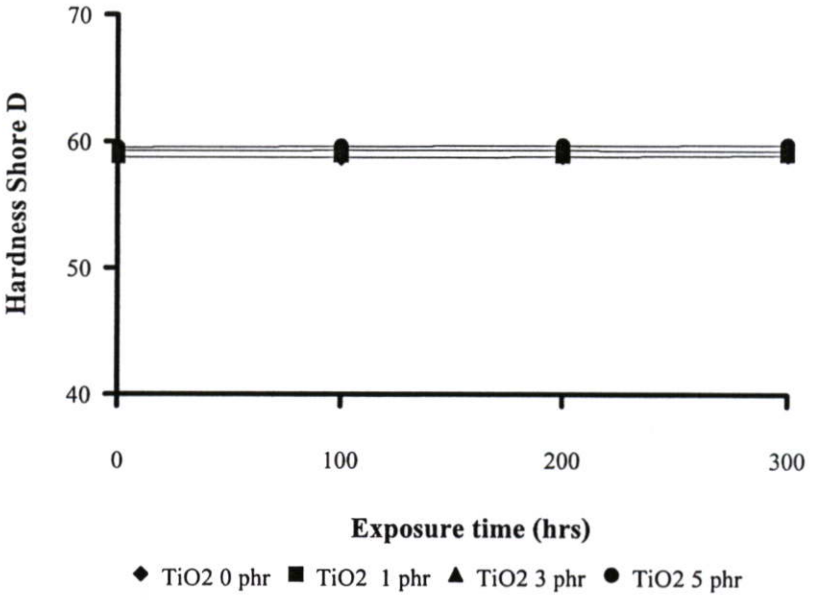


รูปที่ 4.24 ลักษณะการสะท้อนแสงยูวี [47]

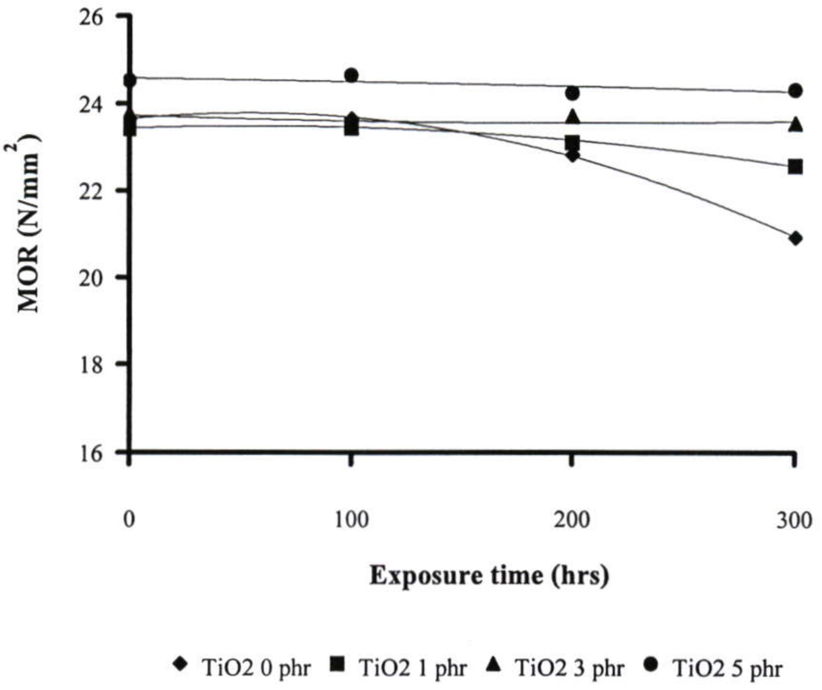
สำหรับการศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ ได้ผลดังรูปที่ 4.25-4.28 และตารางที่ ก. 5 พบว่ารูปที่ 4.25 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับระยะเวลาการฉายแสง เมื่อใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ โดยการเติมไททาเนียมไดออกไซด์ทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งใกล้เคียงกัน ซึ่งอยู่ในช่วง 58.90-59.55 (Shore D) เนื่องจากอนุภาคของไททาเนียมไดออกไซด์มีความแข็งอยู่ในระดับหนึ่ง ดังนั้นเมื่อผสมภายในวัสดุจะทำให้ความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเวลาการฉายแสงนานขึ้นความแข็งของวัสดุเชิงประกอบมีค่าไม่ต่างไปจากเดิมมากนัก

รูปที่ 4.26-4.28 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความต้านแรงดัดโค้ง มอดุลัสยืดหยุ่น และความต้านแรงกระแทกกับระยะเวลาการฉายแสง พบว่าการเติมไททาเนียมไดออกไซด์ทำให้ความต้านแรงดัดโค้งมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยในช่วง 23.44-24.53 N/mm^2 เนื่องจากวัสดุเชิงประกอบมีความแข็งเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้วัสดุมีความต้านทานต่อแรงกดได้สูงขึ้น แต่ไม่มีผลต่อมอดุลัสยืดหยุ่นมากนัก แต่ในส่วนของความต้านแรงกระแทกมีค่า 6.36-6.45 kJ/m^2 ซึ่งมีแนวโน้มลดลง เมื่อการเติมไททาเนียมไดออกไซด์

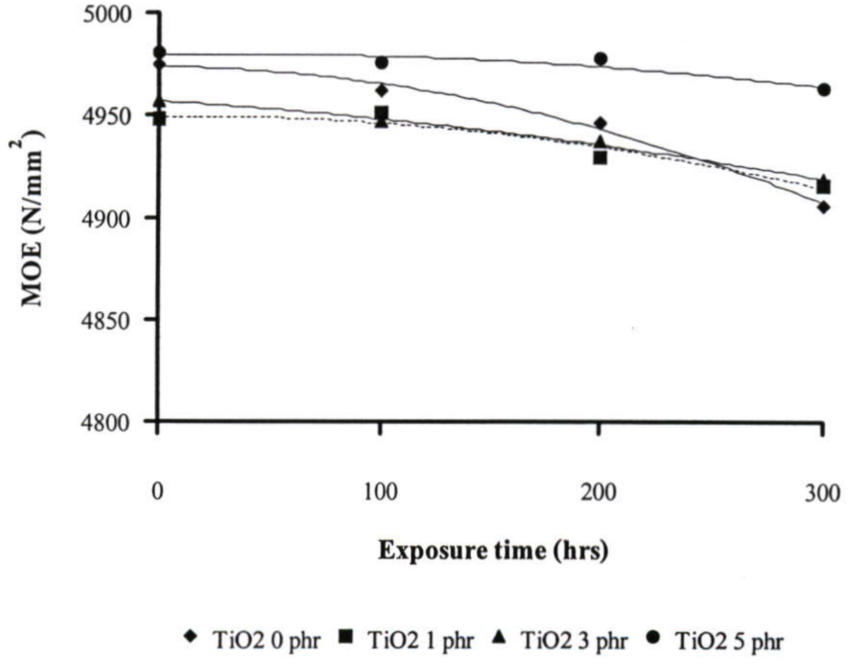
เมื่อทำการพิจารณาเวลาการฉายแสง สมบัติของวัสดุเชิงประกอบมีแนวโน้มลดลง โดยวัสดุที่ไม่เติมไททาเนียมไดออกไซด์มีอัตราการลดลงของสมบัติวัสดุเชิงประกอบมากกว่าวัสดุที่เติมไททาเนียมไดออกไซด์ ขณะที่การเพิ่มปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ ทำให้ลดการสูญเสียสภาพของวัสดุเชิงประกอบลง



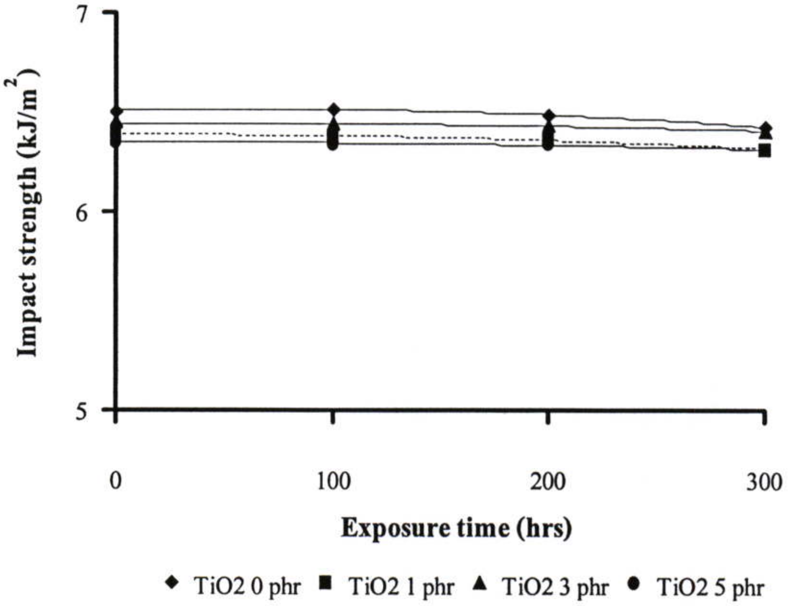
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับระยะเวลาการฉายแสง



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านแรงดัดโค้งกับระยะเวลาการฉายแสง



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสยืดหยุ่นกับระยะเวลาการฉายแสง



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านแรงกระแทกกับระยะเวลาการฉายแสง

4.7 ผลการเปรียบเทียบสมบัติของไม้กับวัสดุเชิงประกอบ

ในการเปรียบเทียบสมบัติของไม้ที่ใช้ทำไม้หมอนรางรถไฟกับวัสดุเชิงประกอบที่ใช้ผงหนังขนาด 5-7 mesh ที่มีการปรับปรุงสมบัติโดยใช้สารเติมแต่งต่างๆ เช่น สารคู่ควบไซเลน หรือไททาเนียมไดออกไซด์ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.6 พบว่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกับไม้ ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบมีความต้านแรงกระแทกดีกว่าไม้ แต่มีความต้านแรงดัดโค้งและมีมอดุลัสยืดหยุ่นน้อยกว่าไม้ ในส่วนของความแข็งของไม้และวัสดุเชิงประกอบนั้นไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบได้ เนื่องจากใช้มาตรฐานในการทดสอบที่ต่างกัน

ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบสมบัติของไม้ที่ใช้ทำไม้หมอนรางรถไฟกับวัสดุเชิงประกอบ

สมบัติ	ไม้ [11, 13]	วัสดุเชิงประกอบ [ผงหนัง (ขนาด 5-7 mesh) 70 phr + ยางรีเคลม 20 phr]			
		ไม่มีการปรับปรุง	ไซเลน A (5 wt%)	ไซเลน B (3 wt%)	ไททาเนียมไดออกไซด์ (1-5 phr)
ความหนาแน่น (g/cm^3)	0.800-1.150	0.957	0.982	0.997	1.040-1.350
ความต้านแรงกระแทก (kJ/m^2)	1.66-4.78	6.51	6.08-6.55	6.37-6.77	6.39-6.45
ความต้านแรงดัดโค้ง (N/mm^2)	77.70-189.82	23.66	22.27-23.94	22.53-24.08	23.42-24.53
มอดุลัสยืดหยุ่น (N/mm^2)	6800-10000	4965.34	4800.51-5042.89	4450.30-5510.61	4947.79-4980.65
ความแข็ง	650-1100 Janka	58.81 Shore D	58.05-58.45 Shore D	58.70-59.35 Shore D	58.9-59.55 Shore D

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การศึกษาการสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบจากขวดพอลิเอทิลีนที่ใช้แล้วกับเศษผงหนังสัตว์เพื่อใช้ทดแทนไม้หมอนรางรถไฟ ซึ่งสามารถสรุปผลการศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้ดังนี้

1. เวลาที่เหมาะสมที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีแม่พิมพ์อัด ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส คือ 5 นาที วัสดุเชิงประกอบมีความหนาแน่นประมาณ 1.030 g/cm^3 ความแข็ง 56.90 (Shore D) ความต้านแรงดัดโค้ง 17.94 N/mm^2 มอดุลัสยืดหยุ่น 4796.85 N/mm^2 และความต้านแรงกระแทก 5.86 kJ/m^2

2. การใช้ผงหนังขนาดแตกต่างกันไม่ส่งผลต่อความแข็ง รวมทั้งความต้านแรงดัดโค้งและมอดุลัสยืดหยุ่น แต่การใช้ผงหนังขนาด 5-7 mesh ทำให้ความต้านแรงกระแทกมีค่าอยู่ในช่วง 4.24-6.51 kJ/m^2 ซึ่งให้ผลดีกว่าผงหนังขนาด 20-29 mesh ซึ่งมีค่า 3.79-6.37 kJ/m^2

3. การเพิ่มปริมาณผงหนังทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็ง ความต้านแรงดัดโค้ง มอดุลัสยืดหยุ่น และความต้านแรงกระแทกเพิ่มขึ้น ซึ่งการใช้ปริมาณผงหนัง 70 phr วัสดุเชิงประกอบมีประสิทธิภาพสูงสุด คือ ความแข็ง 58.81 (Shore D) ความต้านแรงดัดโค้ง 15.03-23.66 N/mm^2 มอดุลัสยืดหยุ่น 2815.65-4965.34 N/mm^2 ความต้านแรงกระแทก 4.34-6.51 kJ/m^2

4. การเพิ่มปริมาณยางรีเคลมทำให้ความแข็งของวัสดุเชิงประกอบมีแนวโน้มลดลง คือ อยู่ในช่วง 53.37-62.47 (Shore D) ซึ่งวัสดุเชิงประกอบมีความต้านแรงดัดโค้งและแรงกระแทกอยู่ในช่วง 15.03-23.51 N/mm^2 และ 4.24-6.51 kJ/m^2 ตามลำดับ สมบัติเหล่านี้มีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณยางรีเคลม เช่นเดียวกับมอดุลัสยืดหยุ่น กล่าวคือการเติมยางรีเคลมเป็นปริมาณมาก เช่น 25 phr ไม่ทำให้สมบัติของวัสดุเชิงประกอบแตกต่างจากการเติม 20 phr มากนัก

5. การใช้ 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อปรับปรุงพื้นผิวของผงหนังทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็ง 58.10 (Shore D) ความต้านแรงดัดโค้ง 23.94 N/mm^2 มอดุลัสยืดหยุ่น 5042.49 N/mm^2 และความต้านแรงกระแทก 6.55 kJ/m^2 ส่วนการใช้เอ็น-อะมิโนเอทิล 3-อะมิโนโพรพิลเมทิลไดเมทอกซีไซเลน วัสดุเชิงประกอบมีความแข็ง 59.10 (Shore D) ความต้านแรงดัดโค้ง 24.08 N/mm^2 มอดุลัสยืดหยุ่น 5510.61 N/mm^2 และความต้านแรงกระแทก 6.77 kJ/m^2 โดยสมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้ผงหนังซึ่งผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนทั้ง 2 ชนิดมีสมบัติดีกว่าวัสดุเชิงประกอบที่ใช้ผงหนังซึ่งไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน

6. การเติมไททาเนียมไดออกไซด์ทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็ง 58.90-59.55 (Shore D) และความต้านแรงดัดโค้ง 23.44-24.53 N/mm^2 ซึ่งเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ไม่ส่งผลต่อมอดุลัส

ยืดหยุ่น ในขณะที่ความต้านแรงกระแทกมีค่า 6.36-6.45 kJ/m^2 ซึ่งมีแนวโน้มลดลง โดยอัตราการเสียสภาพของสมบัติวัสดุเชิงประกอบลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์

7. วัสดุเชิงประกอบมีความต้านแรงกระแทกดีกว่าไม้โดยมีค่าอยู่ในช่วง 6.08-6.77 kJ/m^2 สำหรับความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกับไม้ คือ 0.800-1.150 g/cm^3 แต่มีความต้านแรงดัดโค้งและมีมอดุลัสยืดหยุ่นต่ำกว่าไม้

ในการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมนั้น อาจทำการศึกษาสภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูป เมื่อต้องการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความหนาเพิ่มขึ้น เช่น เวลาและอุณหภูมิ เป็นต้น หรือศึกษาปรับปรุงสมบัติวัสดุเชิงประกอบ โดยการเติมสารเติมแต่งบางชนิดเพื่อเพิ่มสมบัติความต้านแรงดัดโค้งและมอดุลัสยืดหยุ่นให้ดีหรือใกล้เคียงกับสมบัติของไม้

บรรณานุกรม

[1] การรถไฟแห่งประเทศไทย. 2548. [Online]. Available: http:// www.railway.co.th/about/history.asp

[2] กรมป่าไม้. **สถิติป่าไม้ปี 2546**. กรมป่าไม้ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2546.

[3] กรมควบคุมมลพิษ. **สรุปสถานการณ์มลพิษของประเทศ พ.ศ. 2546.** กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2546.

[4] กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2547. **การกำจัดปัญหาขยะและมลพิษ.** [Online]. Available: http://www.pcd.go.th/infoserv/wastewastethai.htm

[5] H. Burger, A. Koine, R. Maron and K. Mieck, **"Use of Natural Fibers and Environmental Aspects,"** International Polymer Science and Technology, 1995, 22(8), p.25-34.

[6] B. Z. Jang, **Advanced Polymer Composites : Principles and Applications**. ASM International, New York, 1994.

[7] F.R. Jones, **Handbook of Polymer – Fibre Composites.** John Wiley & Sons, Inc., New York, 1994.

[8] R.G. Raj, B.V. Kokta, G. Groluleau and C. Daneault, **"The Influence of Coupling Agents on Mechanical Properties of Composites Containing Cellulosic Fillers,"** Polymer Plastic Technology Engineering, 1990, 29(4), p.339-353.

[9] W.B. Bank and J.M. Lawther, **Derivatization of wood in Composition in Cellulose Polymers, Blends and Composites.** Hanser, New York, 1994.

[10] ประณต กุลประสูตร. **เทคนิคงานไม้.** บริษัทอมรินทร์ พริ้นติ้ง กรุ๊ฟ จำกัด. กรุงเทพฯ. 2533.

[11] กรมป่าไม้. **กำลังของไม้** . กองค้นคว้าของป่า. 2583.

[12] กระทรวงอุตสาหกรรม. **มอก. 421-2525 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ไม้แปรรูป : ข้อกำหนดทั่วไป**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ. 2525.

[13] กรมป่าไม้. 2548. **ตารางแสดงค่ากลสมบัติของไม้วงศ์ยางชนิดต่างๆ**. [Online]. Available: http://www.forest.go.th.th/reserch/Knowledge/Mechanical.htm

[14] J.A. Brydson, **Plastics Materials.** 7th edition, Butterworth Heinemann, Oxford, 1999.

[15] มาลินี ชัยศุภกิจสินธ์. **เคมีพอลิเมอร์.** ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2540.

[16] สถาบันวิจัยเพื่อการพัฒนาประเทศไทย. พฤศจิกายน. 2540.

[17] National Health Museum. 2006. **Collagen and elastin.** [Online]. Available: http://www.garlandscience.com/ECB/about.html

[18] W. Holfman, **Rubber Technology Handbook.** Hanser, Munich, 1989.

[19] M. Morton, **Rubber Technology.** 3rd edition, Van Nostrand Reinhold, New York, 1987.

[20] J.M. Ball, **Reclaimed Rubber.** Rubber Reclaimers Association, Inc., New York, 1947.

[21] R.F. Gibson, **Principles of Composite Material Mechanics.** McGraw-Hill, Inc., New York, 1994.

[22] R.M. Jones, **Mechanics of Composite Materials.** 2nd edition, Taylor & Francis, Inc., New York, 1999.

[23] E.P. Plueddemann, **Interfaces in Polymer Matrix Composite.** Acadamic, New York, 1974.

[24] อรอุษา สรวารี. **สารเติมแต่งพอลิเมอร์.** โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ. 2546.

[25] E.P. Plueddemann, **Silanes Coupling Agents**. Plenum Press, New York, 1982.

[26] K.L.Mittal, **Silanes and Other Coupling Agents.** VSP, Netherlands, 1992.

[27] D.G. Baird and I. Collias, **Polymer Processing Principles and Design.** John Wiley & Sons, Inc., New York, 1998.

[28] บรรเลง ศรนิล. **เทคโนโลยีพลาสติก.** พิมพ์ครั้งที่ 17. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น). กรุงเทพฯ. 2540.

[29] รัชดา ขวัญตน. **คอมพอสิตจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้วและเส้นใยอ้อย.** สาขาวิชาเคมีประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2542.

[30] R. Magaraphan, P. Moteplay, C. Towichayathamrong, B. Mojdara, A.M. Jamieson, and D.C. Martin, **"Reactive Blending of Polyethylene,"** Thai-Japan Polymer Processing Workshop, Bangkok, Thailand (March 22-24, Proceeding of 2001), p.80-87.

[31] P.K Pramanik and W.E. Baker, **"Toughening of ground rubber tire filled thermoplastic compounds using different compatibilizer systems,"** Plastics, Rubber and Composites Processing and Applications, 1995, 24(4), p.229-237.

[32] H. Demir, U. Atikler, D. Balköse and F.Tihminloglu, **"The effect of fiber surface treatments on the tensile and water sorption properties of polypropylene luffa fiber composites,"** Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2006, 37(3), p.447-456.

[33] P.J. Herrera-Franco and A Valadez-Gonzalez , **"A study of the mechanical properties of short natural-fiber reinforced composites,"** Composites Part B: Engineering, 2005, 36, p.597-608.

[34] A. Krysztafkiewicz,T. Jesionowski and S. Binkowski, **"Precipitated silicas modified with 3-aminopropyltriethoxysilane,"** Colloids and surfaces, 2000, 173, p.73-84.

[35] Vishu Shah, **Handbook of Plastics Testing Technology.** 2^{nd} edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1998.

[36] ASTM D 256, **Standard Test Methods for Impact Resistance of Plastics and Electrical Insulating Materials.** Philadephia : American Society for Testing and Materials, 2005.

[37] ASTM D 2240, **Standard Test Methods for Hardness of Plastics and Electrical Insulating Materials.** Philadephia : American Society for Testing and Materials, 2005.

[38] ASTM D 790, **Standard Test Methods for Flexural Property of Unreinforce and Reinforce Plastics and Electrical Insulating Materials.** Philadephia : American Society for Testing and Materials, 2005.

[39] ASTM G 154-00 a^{ε_1}, **Standard Practice for Operating Fluorescent Light Apparatus for UV Exposure of Nonmetallic Material.** Philadephia : American Society for Testing and Materials, 2005.

[40] Stanley L. Flegler, John W. Heckman, Jr and Karen L. Klomparens, **Scanning and Transmission Electron Microscopy An Introduction.** Oxford University Press, New York, 1993.

[41] Sean F. Johnston, **Fourier Transform Infrared.** Ellis Horwood, New York, 1991.

[42] D. Hull and T.W. Clyne, **An Introduction to composite.** 2^{nd} edition, Cambridge University Press, Cambridge, 1996.

[43] อิทธิพล แจ้งชัด. **พอลิเมอร์ฟิสิกส์.** ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.

[44] M.C. Matias, M.U. De La Orden, C.G. Sanchez and J.M. Urreaga, **"Comparative Spectroscopic Study of the Modification of Cellusic Materials with Different Coupling Agents,"** J.Appl.Polm.Sci, 2000, 75, p.256-266.

[45] M.N. Brochier Salon, M. Abdelmouleh, S. Boufi, M.N. Belgcem and A. Gandini, **"Silane adsorption onto cellulose fiber : Hydrolysis and condensation reaction,"** J.Colloid Interfacial Science, 2005, 289(1), p.249-261.

[46] แม้น อมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสม. **หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ.** ชวนพิมพ์. กรุงเทพฯ. 2539.

[47] SpecialChem. **Description of TiO_2.** [Online]. Available: http://www.specialchem.com/PolymerAdditives & Colors/TiO_2.htm.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลที่วิเคราะห์ได้จากการศึกษากระบวนการผลิตวัสดุเชิงประกอบ

Compression time (minutes)	Density (g/cm^3)	Hardness shore D	MOR (N/mm^2)	MOE (N/mm^2)	Impact strength (kJ/m^2)
3	1.034	56.80	15.02	4652.06	2.59
4	1.030	56.93	16.98	4714.29	5.14
5	1.030	56.90	17.94	4796.85	5.86
6	1.027	56.72	18.01	4808.00	5.79

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลที่วิเคราะห์ได้จากการศึกษาผลกระทบของขนาดและปริมาณผงหนังที่มีต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ

Reclaimed rubber (phr)	Leather dust (phr)	Hardness (Shore D)		Impact strength (kJ/m^2)		MOR (N/mm^2)		MOE (N/mm^2)	
		5-7 mesh	20-29 mesh	5-7 mesh	20-29 mesh	5-7 mesh	20-29 mesh	5-7 mesh	20-29 mesh
15	10	54.52	54.70	5.26	4.12	19.96	18.15	3601.70	3065.96
	30	58.60	58.67	5.81	3.96	18.56	18.52	3692.43	3364.26
	50	59.76	59.33	5.42	3.79	22.07	22.00	3884.19	3905.74
	70	60.80	60.27	6.46	4.51	22.01	21.62	3871.53	3964.94
	90	58.08	60.55	5.75	4.35	19.43	18.38	3826.00	3810.29

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลที่วิเคราะห์ได้จากการศึกษาผลกระทบของปริมาณยางรีเคลมที่มีต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ

Leather dust (phr)	Reclaimed rubber (phr)	Hardness (Shore D)	Impact strength (kJ/m^2)	MOR (N/mm^2)	MOE (N/mm^2)
70	5	64.22	5.76	19.09	3500.74
	10	62.44	5.81	22.90	3852.70
	15	60.8	6.46	22.01	3871.53
	20	58.81	6.51	23.66	4965.34
	25	57.38	6.34	20.82	4850.11

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลที่วิเคราะห์ได้จากการศึกษาประสิทธิภาพและปริมาณสารคู่ควบไซเลนใช้ปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยผงหนัง

Silane content (wt%)	Hardness Shore D		Impact strength (kJ/m^2)		MOR (N/mm^2)		MOE (N/mm^2)	
	Silane A	Silane B	Silane A	Silane B	Silane A	Silane B	Silane A	Silane B
0	58.81	58.81	6.51	6.51	23.56	23.66	4965.34	4965.34
1	58.50	58.90	6.17	6.37	23.14	22.53	4892.79	4450.3
2	58.30	59.35	6.33	6.52	22.27	23.69	4800.51	5102.73
3	58.05	59.10	6.08	6.77	22.45	24.08	4871.09	5510.61
4	58.45	58.70	6.34	6.68	23.17	23.87	4937.9	5470.14
5	58.10	58.85	6.55	6.66	23.94	23.72	5042.89	5300.86

<u>หมายเหตุ</u> A คือ 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (3-Aminopropyl-triethoxysilane)

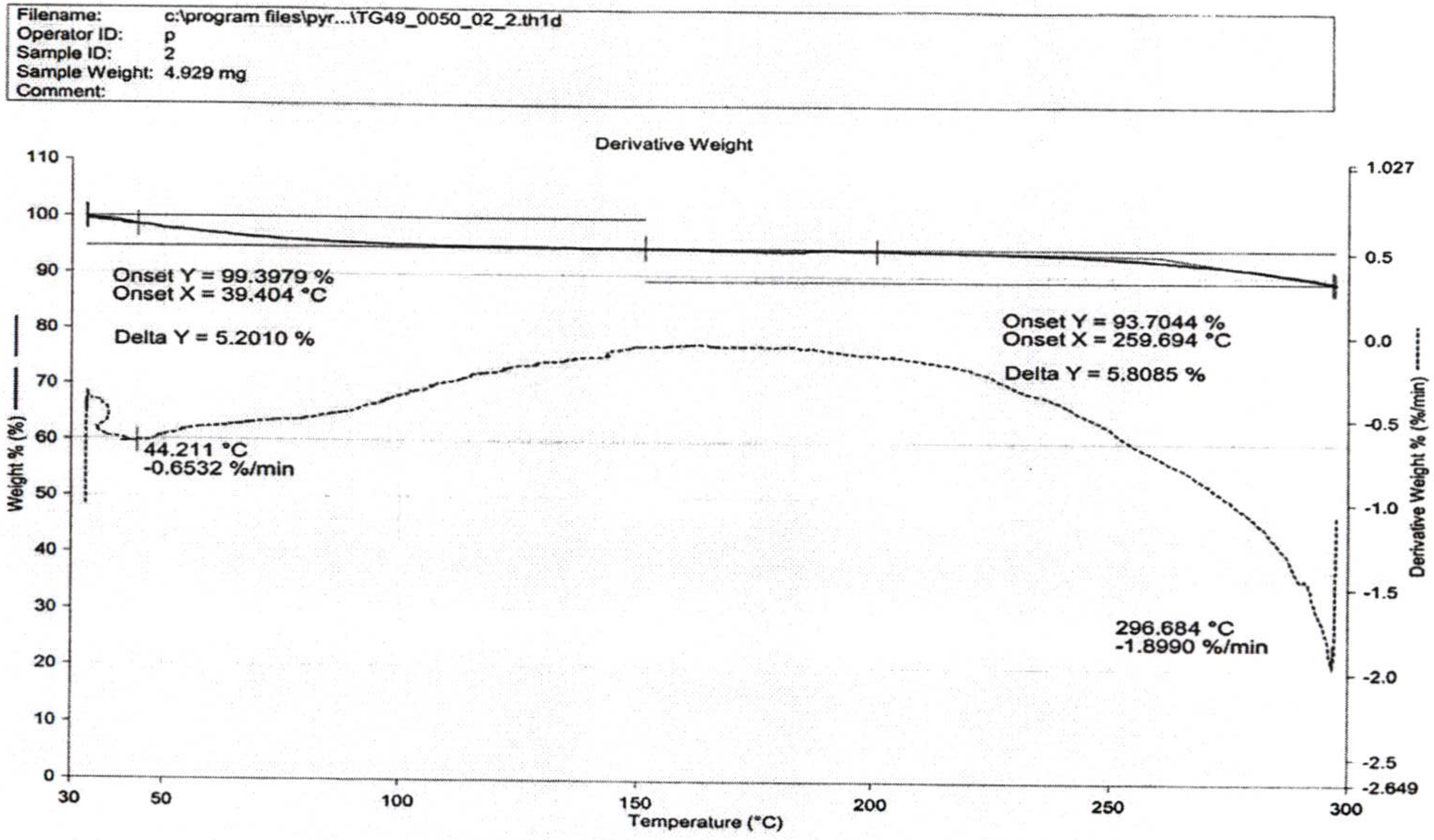
B คือ เอ็น-อะมิโนเอทิล 3-อะมิโนโพรพิลเมทิลไดเมทอกซีไซเลน (N-aminoethyl-3-aminopropylmethyldimethoxysilane)

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลที่วิเคราะห์ได้จากการศึกษาผลกระทบของปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ

TiO_2 (phr)	Exposure time (hrs)	Hardness (Shore D)	Impact strength (kJ/m^2)	MOR (N/mm^2)	MOE (N/mm^2)
0	0	58.81	6.51	23.66	4974.63
	100	58.74	6.52	23.64	4962.05
	200	58.85	6.49	22.82	4946.31
	300	58.93	6.43	20.93	4906.14
1	0	58.9	6.39	23.42	4947.79
	100	58.96	6.38	23.51	4950.85
	200	58.93	6.36	23.1	4929.64
	300	59.02	6.32	22.57	4916
3	0	59.25	6.45	23.78	4957.23
	100	59.37	6.44	23.44	4946.62
	200	59.26	6.43	23.7	4936.95
	300	59.29	6.41	23.53	4918.47
5	0	59.55	6.36	24.53	4980.65
	100	59.64	6.34	24.65	4975.12
	200	59.7	6.34	24.23	4977.11
	300	59.73	6.31	24.31	4962.48

ภาคผนวก ข.

การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของผงหนัง



ภาคผนวก ค.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. จันทนา เทศเจริญและไพศาล นาคพิพัฒน์. **การสังเคราะห์วัสดุประกอบจากขวดพอลิเอทิลีนที่ใช้แล้วกับเศษผงหนังสัตว์ เพื่อใช้ทดแทนไม้หมอนรางรถไฟ**. วิศวสารลาดกระบัง 23 (2). มิถุนายน 2549.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นางสาวจันทนา เทศเจริญ
วันเดือนปี	วันที่ 11 พฤษภาคม 2524
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี	วท.บ.(เคมี) เคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอม- เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีที่สำเร็จการศึกษา	2546